



Université de Montpellier II

Ecole doctorale « Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences et Environnement » (SIBAGHE)

Evaluation environnementale par l'Analyse de Cycle de Vie des systèmes de production agricole

Premiers acquis et perspectives de recherche pour l'évaluation et l'amélioration de la performance environnementale des systèmes horticoles au Sud

Claudine Basset-Mens

Mémoire présenté pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches
Soutenue le 30 Mars 2015, devant un jury composé de :

Christine Aubry	Ingénieur de recherche Hors Classe, INRA/AgroParisTech	Rapporteuse
Christian Bockstaller	Ingénieur de recherche INRA Colmar	Rapporteur
Véronique Bellon-Maurel	Ingénieur en chef des Ponts des Eaux et des Chaussées, IRSTEA	Rapporteuse
Michael Corson	Chercheur INRA	Examineur
Thierry Doré	Ingénieur agronome, professeur AgroParisTech	Examineur
Christian Gary	Directeur de recherche INRA Montpellier	Représentant de l'école doctorale

Unité de recherche Hortsys
CIRAD-Persyst
19 Septembre 2014

Remerciements

Le premier auquel j'ai pensé en écrivant ces remerciements est Robert Habib. Il a été et restera un modèle dans ma vie professionnelle et j'ai une grande gratitude pour la vision, la confiance et le soutien qu'il a apportés à la thématique de l'évaluation environnementale au CIRAD et à ma petite personne au passage. Il nous a donné les moyens de nos ambitions ! Je l'en remercie profondément.

Je remercie également ses successeurs au département PERSYST du CIRAD : François Côte, Hervé Saint Macary, et Nadine Zakhia, qui ont poursuivi dans cette voie avec cohérence et conviction. Merci en particulier à Hervé et Nadine pour leur soutien, leur disponibilité et leur écoute au quotidien.

Bien sûr, je pense à Eric Malézieux qui m'a accueillie dans son unité, soutenue dans mon projet d'HDR et a trouvé le temps de relire mes premiers brouillons au cœur de l'été déserté ! Je l'en remercie sincèrement. Je remercie Magalie Jannoyer, ma chef du bout du monde qui m'apporte son soutien dans toutes mes entreprises et qui sait être là même en étant loin !

Je remercie mes chers collègues d'Hortsys, de tout ce qu'ils m'ont appris et de tout ce qu'ils m'apprendront encore : Henri, rallié de la première heure, Laurent, qui a lu tous les livres (le pauvre !), Joël et Serge qui ont offert à Aurélie un accueil irremplaçable sur le terrain, Fabrice, avec qui nous avons de grandes choses à faire !, Thierry Michels et Frédéric Normand, pour tous les foudres au séminaire ! et pour tout ce qu'on a envie de construire ensemble ! Thibaud Martin avec qui encore une fois, j'espère pouvoir construire de belles choses très bientôt ! et Merci Serge pour la relecture !

Je remercie Rabani, mon collègue et ami pour les belles perspectives de travail ensemble, pour son enthousiasme pour l'ACV et son énergie à faire évoluer les choses dans le « bon sens » !

Je remercie mes collègues et amis Cécile Bessou, Yannick Biard, Anthony Benoist, tous très fous, très passionnés et avec qui il fait bon relever les défis les plus impossibles (même celui d'avoir 40 ans !). Je remercie nos chers « expatriés », non ce n'est pas une maladie même si cela peut-être contagieux... qui parviennent à construire et nourrir nos débats malgré l'éloignement : Sylvain, Julien, Thierry, Tom.... Je remercie en particulier très chaleureusement Sylvain pour tous nos échanges, pour le rôle qu'il a joué dans l'évaluation du travail d'Aurélie et aujourd'hui dans l'encadrement de la thèse de Sandra. Ça fait du bien d'avoir un « grand » au-dessus de soi ! Merci aussi (et bienvenue) à Ralph pour sa contribution dans l'évaluation de la thèse d'Aurélie !

Je remercie mes collègues et amis d'Elsa, tous sans exception, qui font la vie scientifique de l'ACV à Montpellier dans une grande convivialité. Merci Philippe, merci Véro, merci Catherine, merci Arnaud, merci Laurent (parti trop tôt !). On aimerait être encore plus près de vous !

Bien sûr j'ai gardé pour la fin : la jeunesse et l'avenir : tous mes « chers petits » !

Je remercie profondément ceux qui font la vie et l'espoir de cette recherche : mes doctorantes ! Merci Brigitte, ma chère amie pour le chemin démarré ensemble et qui ne s'arrêtera pas, merci Aurélie, mon infatigable modélisatrice qui n'a pas plus peur de STICS que du terrain au Bénin, merci Sandra pour ta confiance, ta rigueur, ta gentillesse, ton enthousiasme et pour toutes les ambitions qu'il nous reste encore à réaliser ! Merci Aurélie et Sandra pour vos relectures !

Merci à tous mes stagiaires : Lamiaa, Stan, Christophe, Hadrien, Sandra (déjà !), Maéva, Melaine, tous brillants et merveilleusement humains qui ont apporté leur pierre à l'édifice.

Pour finir, j'ai une pensée pour ceux qui m'ont fait confiance, encadrée, nourrie, construite par le passé et qui me manquent aujourd'hui : tous mes collègues et amis de Nouvelle Zélande : Liz, Bruce, Mark Boyes, Stewart Ledgard, Paula, Upananda, Cécile De Klein, Frank Kelliher (thank you !), et tous mes collègues et amis du temps de la thèse en Bretagne : Patrick, Philippe Leterme, Mélinda, Paul, Thierry Morvan, Jean-Marie Paillat, Françoise, Joël, Michaël,

et toi Hayo, mon cher ami, dont je tente encore d'appliquer au quotidien... la sagesse !

Merci à tous et pardon à ceux qui ne sont pas nommés et qui pourtant auront compté dans ce parcours !

*« Viens, disait la Muse,
Chante-moi une chanson qu'aucun poète n'a encore chantée,
Chante-moi l'universel.*

*Sur cette vaste terre qui est la nôtre,
Emplie de vulgarité et d'innombrables déchets,
Enfermée et paisible en son cœur même,
Se blottit la graine de la perfection. »*

Passage du « Chant de l'universel » de Walt Whitman, cité par Daisaku Ikeda, Le Cycle de la Vie, livre offert par Brigitte

Résumé

Pour évaluer les fonctions nécessaires à la vie humaine, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) s'impose comme méthode d'évaluation consensuelle au niveau international. L'ACV permet d'évaluer l'ensemble des impacts environnementaux associés à la réalisation d'une fonction (produit, service) sur tout son cycle de vie. Appliquer l'ACV aux fonctions des systèmes agricoles reste un défi en lien avec la diversité des systèmes de production et de leurs fonctions, le double statut du sol qui appartient à la fois au système productif et à l'environnement, à la nature diffuse et variable des pollutions au champ et à l'importance des impacts régionaux comme l'eutrophisation et la consommation de ressources naturelles : eau et terre. Si les questions scientifiques de fond sont globalement les mêmes que l'on cherche à appliquer l'ACV à des systèmes de production animale en zone tempérée ou à des systèmes horticoles au sud, l'ampleur du défi est cependant bien plus vaste dans le second cas. Ces systèmes, souvent mal encadrés, parfois mal optimisés, toujours peu renseignés sont d'une grande diversité et leurs interactions avec l'environnement sont moins étudiées qu'en contexte tempéré.

Dans le cadre de mes travaux sur les systèmes de production porcine, j'ai contribué à hiérarchiser les sources de variation des impacts qu'elles soient d'ordre technique (cahier des charge, qualité des pratiques) ou d'ordre méthodologique avec l'exploration de l'influence du devenir des nitrates dans les bassins versants sur les indicateurs eutrophisation et changement climatique. Pour réaliser ces évaluations, j'ai mis au point avec mes collègues des méthodes d'estimation des flux au champ et en atelier animal permettant une évaluation cohérente de systèmes contrastés. En production laitière en Nouvelle Zélande, j'ai notamment montré l'influence de l'intensification des systèmes sur la dégradation de leur éco-efficience et l'influence du mode de représentation de l'incertitude des paramètres sur le calcul de l'incertitude des résultats d'ACV par simulation Monte-Carlo.

Sur les systèmes horticoles au sud, le premier enjeu est de caractériser proprement la diversité des systèmes et de produire leur inventaire avec peu ou pas de données préalables. Sur système pérenne, nous avons montré l'importance de prendre en compte toute la vie du verger et formulé des recommandations. Sur la tomate en zone urbaine au Bénin où aucune donnée n'était disponible, Aurélie Perrin a utilisé la typologie à dires d'expert pour échantillonner ses parcelles et produit un protocole de collecte de données d'inventaire fiables et représentatives de la fonction étudiée. Si l'usage de modèles mécanistes tels que STICS permet une exploration des sources de variations des émissions au champ et la prise en compte plus fine des conditions de sol, de climat et de pratiques, il appelle, pour être utile aux praticiens d'ACV, une simplification autour des paramètres principaux et une validation ultime par des données de flux mesurés.

Pour l'avenir proche, j'ai construit mon projet scientifique autour de deux axes. Le premier est un projet collectif et pluridisciplinaire d'évaluation et d'amélioration de la performance des systèmes maraîchers en Afrique de l'Ouest où les déterminants de la performance des systèmes aux niveaux exploitation et parcelle seront explorés et une méthode d'estimation des flux de pesticides tenant compte des spécificités du contexte sera développée pour mieux évaluer d'éventuelles innovations sur la gestion des bio-agresseurs. Le second axe porté par Sandra Payen dans le cadre de sa thèse et d'un futur post-doctorat s'intéresse aux impacts liés à l'usage d'eau douce avec un travail sur la modélisation des flux de sels et d'eau à la parcelle et de leurs impacts associés tels que la salinisation.

Table des matières

1.	Itinéraire professionnel	11
1.1.	Parcours scientifique et technique.....	11
1.2.	Activités d'encadrement	14
1.3.	Animation et gestion de la recherche	15
1.3.1.	Participation à l'émergence et à l'animation du pôle ELSA	15
1.3.2.	Contribution à l'animation du thème ACV au CIRAD	15
1.3.3.	Montage de projets de recherche en partenariat sur l'ACV des systèmes de production	17
2.	Synthèse des travaux scientifiques	20
2.1.	Contexte, enjeux et questions scientifiques	20
2.2.	Les grandes questions scientifiques traitées.....	25
2.3.	Concevoir des systèmes représentatifs d'une fonction d'ACV : prise en compte de la variabilité et de la diversité spatiale et temporelle des systèmes étudiés	26
2.3.1.	L'ACV des produits animaux en zone tempérée : statistiques et expérimentations	26
2.3.2.	L'ACV des produits horticoles au sud : le retour à la ferme !.....	27
2.3.3.	La modélisation du système pérenne en ACV.....	31
2.4.	Etablir un inventaire des flux au champ ou à l'atelier de production animal	33
2.4.1.	Inventaire des flux des systèmes courants bien étudiés.....	33
2.4.2.	Inventaire des flux de systèmes alternatifs ou prospectifs.....	36
2.4.3.	Inventaire des flux par modélisation.....	37
2.4.4.	Conclusions.....	39
2.5.	Modélisation des impacts environnementaux prépondérants pour les systèmes agricoles	39
2.5.1.	Analyse du modèle conceptuel des impacts en ACV et proposition pour une meilleure prise en compte de l'eutrophisation aquatique.....	39
2.5.2.	Mise au point de facteurs de devenir du nitrate dans une région de production agricole intensive.....	41
2.5.3.	Importance d'une prise en compte fiable des impacts liés à l'usage d'eau douce : illustration sur la comparaison d'une tomate d'export et d'une tomate française.....	42
2.5.4.	Analyse des chaînes de cause à effet des impacts de salinisation et propositions de travail	43
2.6.	Connaissances acquises sur l'éco-efficience des fonctions des systèmes de production animaux et végétaux	45
2.7.	Robustesse et incertitude des résultats d'ACV	48
2.8.	Bilan chiffré des publications	50
3.	Projet de recherche.....	51

3.1.	Enjeux, contraintes et besoins de l'horticulture au sud.....	51
3.1.1.	Les productions horticoles d'export.....	51
3.1.2.	Le cas de l'horticulture urbaine et péri-urbaine.....	51
3.1.3.	Les systèmes horticoles complexes comme modèles pour l'avenir ?.....	53
3.2.	Enjeux scientifiques et méthodologiques pour l'évaluation et l'amélioration des systèmes horticoles au sud	54
3.2.1.	Principaux acquis sur l'évaluation des systèmes horticoles du Sud.....	54
3.2.2.	Perspectives de recherche	56
3.3.	Projet scientifique	57
3.3.1.	Comment évaluer et améliorer la performance des systèmes maraîchers urbains en Afrique de l'Ouest.....	57
3.3.2.	Vers une meilleure prise en compte des impacts liés aux usages d'eau en système horticole – la prise en compte de la salinisation (Thèse Sandra Payen)	65
3.3.3.	Défis à relever à plus long terme.....	69
3.3.4.	Conclusions.....	71
4.	Liste des références bibliographiques.....	72
5.	Annexes	78

1. Itinéraire professionnel

Dans cette partie, je propose une version rédigée synthétique de mon parcours, de mes activités d'encadrement puis de mes activités d'animation et de gestion de la recherche. Mon Curriculum Vitae exhaustif est proposé en annexe 1 suivi en annexe 2 de la liste de mes publications scientifiques et en annexe 3 de la liste des personnes que j'ai encadrées. En annexe 4, une sélection de 5 publications est proposée.

1.1. Parcours scientifique et technique

J'ai démarré ma carrière en 1998 au sein d'un centre de recherche tunisien (l'INRGREF de Tunis) par un contrat qui faisait suite à mon stage de fin d'étude de cursus ingénieur agronome (Montpellier) avec la mission de produire un diagnostic sanitaire et agronomique de la réutilisation des eaux usées sur les terrains de golf tunisiens. J'avais un statut d'ingénieur de recherche « tunisien » au sein d'une équipe strictement tunisienne et encadrée par une chercheuse tunisienne, Akissa Bahri. J'ai publié avec elle les résultats de ces travaux dans un journal scientifique (Bahri et al. 2000 ; Bahri et al. 2001). De retour en France, j'ai été embauchée en tant que chargée d'études à l'UNCAA (aujourd'hui INVIVO – groupement national des coopératives agricoles d'agro-fouritures) où ma mission de chargée d'études était d'encadrer sur les plans technique, réglementaire et commercial la réutilisation des matières organiques en agriculture auprès des coopératives françaises. Je représentais notamment la coopération agricole au bureau de normalisation des systèmes de cultures et amendements organiques (BNSCAO) dans le cadre de la révision de la norme NF sur les amendements organiques. Cette étape de ma carrière m'a apporté des compétences concrètes sur les problèmes et enjeux techniques, réglementaires, logistiques et commerciaux associés à la réutilisation des sous-produits organiques en agriculture. Cependant, la difficulté que je rencontrais au quotidien était la complexité de mon sujet technique. Les connaissances sur le recyclage des matières organiques exogènes en agriculture étaient encore surtout au niveau de la recherche et pas encore à un stade de diffusion opérationnelle auprès des techniciens et des agriculteurs. Ce constat associé à mon goût pour l'approfondissement des sujets complexes et pour la recherche que j'avais expérimentée en Tunisie m'a donné l'envie de me lancer véritablement dans une carrière scientifique.

Réfléchissant à ma réorientation, j'avais déjà identifié à l'époque le CIRAD comme l'organisme au sein duquel je souhaitais travailler. Ayant postulé à des postes de chercheur au CIRAD sans succès car n'ayant pas de doctorat, le projet de faire une thèse m'est apparu de plus en plus évident pour relancer ma carrière scientifique. J'ai démissionné de l'UNCAA pour monter un projet de thèse en autonomie dans lequel j'ai tenté d'impliquer le laboratoire dirigé à l'époque par Hervé Saint Macary sur la matière organique des sols au CIRAD (MOST). Le projet de cette thèse était de travailler sur les dynamiques du carbone et de l'azote des effluents de distillerie vinicole. Ayant obtenu un financement de la fédération des distilleries vinicoles françaises mais pas de consensus sur le projet scientifique et technique, j'ai finalement décidé d'accepter une offre de thèse, proposée dans le cadre du programme Porcherie verte, sur l'évaluation environnementale de la production porcine en Bretagne au sein de l'UMR SAS à l'INRA de Rennes. Proposé par Hayo van der Werf et Philippe Leterme, mon sujet de thèse au croisement des disciplines de l'agronomie et des sciences environnementales était alors un sujet pionnier. J'ai travaillé en étroite collaboration avec mon encadrant principal Hayo van der Werf et également avec de nombreux collègues comme Patrick

Durand, Paul Robin, Thierry Morvan, Jean-Marie Paillat, Mélinda Hassouna, Pierre Arousseau et Françoise Vertès pour répondre aux enjeux pluridisciplinaires de ce travail d'intégration scientifique. J'y ai principalement travaillé sur l'évaluation environnementale et la comparaison par l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) de scénarios de production de porc contrastés, sur la modélisation de l'impact eutrophisation aquatique et sur la prise en compte et la hiérarchisation des différentes sources d'incertitude et de variation dans les résultats d'ACV. Cette thèse atypique de par sa dimension et son échelle d'approche globale a ainsi été pour moi l'occasion de m'initier aux disciplines scientifiques de l'évaluation environnementale, de l'agronomie, de l'estimation des flux de polluants depuis les systèmes agricoles, de l'hydrologie, de la modélisation, des phénomènes d'eutrophisation, et au dialogue interdisciplinaire. Elle m'a aussi permis d'accéder à la maîtrise d'un cadre conceptuel puissant et très porteur qui est aujourd'hui reconnu dans le monde entier : celui de l'Analyse du Cycle de Vie que je présente brièvement en partie 2. Cette phase s'est concrétisée en plus du manuscrit de thèse par 7 publications scientifiques de rang A dont 5 en premier auteur (Basset-Mens et van der Werf, 2005 ; Basset-Mens et al. 2006a, 2006b, 2006c ; Basset-Mens et van der Werf, 2007). Au cours de cette phase, j'ai largement développé mon réseau scientifique international en participant à plusieurs conférences (Basset-Mens et van der Werf, 2003, 2004a, 2004b ; Basset-Mens et al. 2004) mais aussi en associant des chercheurs reconnus sur le sujet dans mon comité de thèse puis dans mon jury comme Gérard Gaillard (Agroscope, Suisse), Reinout Heijungs (Université de Leiden, Pays-Bas), Philippe Girardin (INRA, Colmar).

A l'issue de ma thèse, j'ai été recrutée à AgResearch en Nouvelle Zélande pour un poste permanent positionné comme « senior scientist » sur la thématique de l'efficacité environnementale des systèmes de production agricole et alimentaire du secteur pastoral. AgResearch est le premier centre de recherche néozélandais par ses effectifs. Il est positionné sur le secteur pastoral, secteur agricole le plus important en Nouvelle Zélande. J'y suis restée 3 ans au cours desquels j'ai travaillé sur l'évaluation environnementale et l'amélioration des systèmes pastoraux (lait, viande, laine) ainsi que sur l'adaptation de la méthodologie ACV pour l'évaluation environnementale de ces systèmes. Aux côtés de mon manager Stewart Ledgard et avec l'aide d'autres collègues, j'ai contribué à consolider et à faire reconnaître par la publication scientifique cette compétence nouvelle dans mon laboratoire en publiant notamment la première étude ACV sur le lait de Nouvelle Zélande et sur l'influence de l'intensification du système traditionnel sur les impacts par kilogramme de lait (Basset-Mens et al. 2009a). J'ai également travaillé sur la question de l'incertitude des résultats d'ACV en publiant un travail à visée méthodologique et pédagogique qui comparait et discutait différentes façons de réaliser des simulations Monte-Carlo en ACV (Basset-Mens et al. 2009b). Cette phase de ma carrière a été d'une très grande richesse sur tous les plans : à la fois strictement scientifique (collaboration sur des thématiques transversales sur de nombreux projets, publication), managérial (encadrement d'un technicien et de stagiaires de niveau master), montage et gestion de projets (responsabilité de la gestion complète d'un panel de projets scientifiques), mais aussi humaine et culturelle. J'y ai notamment découvert une vision du management pragmatique et humaine où l'individu quel qu'il soit a son espace d'initiative et de réalisation et où l'on donne à la notion d'encadrement toute son importance dans une optique d'efficacité de l'entreprise et d'épanouissement de l'individu. Un autre point marquant de cette mission a été la réalisation d'une prestation de recherche appliquée pour la plus grosse coopérative laitière de Nouvelle Zélande qui m'a permis d'évoluer scientifiquement au plus près des préoccupations concrètes d'un industriel moderne sur le sujet de l'évaluation environnementale de ses produits. Enfin, cette phase a également été pour moi l'occasion de

compléter très largement mon réseau scientifique international en participant à plusieurs conférences en Europe, en Nouvelle Zélande et en Australie (Basset-Mens et al. 2005 ; Basset-Mens et al. 2006d, 2006e ; Ledgard et al. 2007 ; Basset-Mens et al. 2007a, 2007b ; Basset-Mens, 2008 ; Basset-Mens et al. 2008).

Malgré l'intérêt et l'intensité de ces expériences en Nouvelle Zélande, j'ai répondu favorablement à une offre de « poste d'accueil scientifique de haut niveau » au Cemagref de Montpellier pour rentrer travailler en France. Démarrant au Cemagref en avril 2008, ma mission était d'initier des travaux de recherche sur l'ACV, de contribuer à la dynamique d'animation et à l'encadrement méthodologique de cette thématique nouvelle au sein du Cemagref et d'encadrer des thèses. Cette phase assez ouverte sur le plan des objectifs m'a permis de rédiger un papier d'analyse critique de l'ACV par rapport à l'évaluation de la durabilité des fonctions alimentaires avec des collègues des sciences économiques et sociales (Basset-Mens et al. 2009), d'expérimenter mon premier encadrement d'une doctorante et de participer activement à la dynamique naissante du pôle ELSA que je développe par la suite (<http://www.elsa-lca.org>). Mon poste n'étant cependant qu'à durée déterminée (3 ans) et n'étant pas clairement positionné sur mon propre domaine d'expertise : l'évaluation environnementale des systèmes agricoles, j'ai postulé au CIRAD lors de l'ouverture de plusieurs postes de chercheurs en évaluation environnementale au sein du département PERSYST. J'ai été recrutée le 1^{er} avril 2009 dans l'UPR Hortsys du CIRAD à un poste de chercheur sur l'évaluation environnementale des produits horticoles tropicaux.

Depuis plus de 5 ans, mes missions au CIRAD sont les suivantes :

1. Production de connaissances scientifiques nouvelles sur mon objet d'étude, publication et préparation d'une HDR, impliquant l'encadrement de jeunes (stagiaires, doctorants, nouveaux recrutés) et collaboration avec des collègues agronomes de l'unité (cf. partie 1.2 puis partie 2. Synthèse des travaux scientifiques)
2. Animation, structuration de la thématique scientifique au CIRAD et connexion au réseau français et international avec notamment l'organisation d'une école chercheur dès la première année sur la demande de la direction de PERSYST (cf. partie 1.3.2)
3. Montage de projets de recherche en partenariat sur l'ACV des systèmes horticoles tropicaux (cf. partie 1.3.3)
4. Participation à l'émergence et à l'animation du pôle ELSA (cf. partie 1.3.1)

Je travaille dans l'équipe ECOS (évaluation et conception de systèmes de culture) de l'unité Hortsys du CIRAD sous l'encadrement direct de la chef d'équipe Magalie Jannoyer et de mon chef d'unité Eric Malézieux. J'ai été le premier cadre de recherche embauché sur le sujet de l'évaluation environnementale au CIRAD dans la vague de recrutements planifiés par le département PERSYST en 2009. Je travaille en étroite collaboration avec plusieurs collègues notamment agronomes et économiste sur les filières arboriculture d'une part (Henri Vannière, Fabrice Le Bellec) et maraîchage d'autre part (Laurent Parrot, Christian Langlais, Joël Huat, Serge Simon, Thibaud Martin). J'encadre chaque année un ou plusieurs stagiaires, un doctorant et depuis mi-mars 2010 un ingénieur agronome recruté dans l'unité Hortsys dont la mission est transversale à différentes unités. Je suis également active au niveau de différents cercles d'animation sur l'analyse de cycle de vie et

l'évaluation environnementale, à la fois en interne et en externe au CIRAD, au sein du pôle ELSA au bureau duquel je représente le CIRAD et plus largement au niveau français et international (Figure 1 : organigramme). Je détaille ces aspects dans les chapitres suivants.

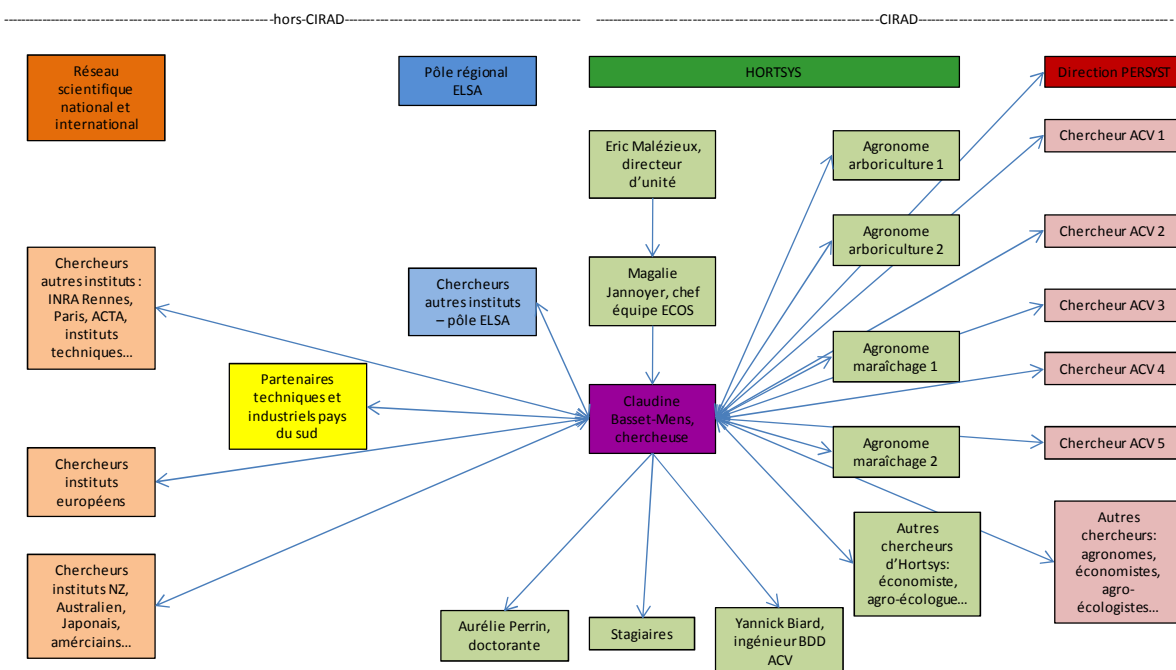


Figure 1. Positionnement personnel au sein de l'unité et des différents cercles d'interaction professionnelle

1.2. Activités d'encadrement

J'ai eu l'occasion d'encadrer des stagiaires depuis le début de ma carrière en Tunisie et au cours de toutes mes expériences professionnelles qu'elles soient techniques ou scientifiques. Les personnes encadrées ont surtout été des étudiants de niveau ingénieur en stage de fin d'étude (une bonne dizaine depuis le début de ma carrière) mais aussi des collègues tels qu'un technicien en Nouvelle Zélande ou notre ingénieur base de données ACV aujourd'hui (Yannick Biard). Mon activité d'encadrement s'est accélérée depuis mon recrutement au CIRAD. En plus de l'encadrement de stagiaires en master, j'ai encadré en tant qu'encadrante principale, et avec l'aide de leur directeur de thèse, plusieurs doctorantes : Brigitte Langevin, Aurélie Perrin et Sandra Payen et un post-doctorant australien : Mitchell Burns. Je participe également à plusieurs comités de thèse. Mon activité d'encadrante m'a permis d'exprimer et de développer certaines compétences spécifiques et différentes des compétences strictement scientifiques que j'apprécie tout particulièrement et qui donnent à mon travail une dimension collective et de transmission qui m'est extrêmement chère. J'ai eu l'occasion de me former au management en Nouvelle Zélande ce qui m'a beaucoup apporté dans ma pratique d'encadrante (et même d'encadrée). J'attache un soin extrême à tous mes recrutements qu'il s'agisse d'étudiants en master ou de doctorants. J'ai ensuite un engagement total au près des gens que j'encadre qui me conduit le plus souvent à y consacrer l'essentiel de mon temps. L'encadrement est aujourd'hui ce qui donne le plus de sens à mon travail et j'aimerais pouvoir encadrer des étudiants et doctorants du sud. La liste des personnes que j'ai encadrées est présentée en Annexe 3.

1.3. Animation et gestion de la recherche

La recherche en ACV, que l'on décrit souvent comme une science de l'intégration, implique par essence une dimension d'animation. Dès ma thèse, j'ai travaillé avec de nombreux experts allant de l'océanologue à l'expert des systèmes de production porcine biologique. J'ai notamment constitué et animé un forum d'experts sur les pollutions diffuses agricoles pour élaborer des méthodes d'inventaires des flux au champ et en atelier animal. A AgResearch en Nouvelle Zélande, pour commencer à réfléchir à l'inclusion de la dimension sociale dans l'ACV, j'ai créé un petit groupe pluridisciplinaire incluant des chercheurs en science sociales, en sciences économiques, en sciences de la vie et en évaluation globale par l'ACV. Ce groupe a continué à fonctionner après mon départ.

A mon retour en France en 2008, mes activités d'animation se sont intensifiées dans le contexte de recherche montpellierain où la thématique ACV était naissante. C'est ce que je présente dans les parties 1.3.1. et 1.3.2.

1.3.1. Participation à l'émergence et à l'animation du pôle ELSA

J'ai démarré l'aventure du pôle Elsa à ses débuts quand j'étais au CEMAGREF d'où l'idée de ce pôle est partie portée par Véronique Bellon-Maurel et Philippe Roux. J'ai participé avec eux à la conception des missions de ce pôle et à toute sa philosophie d'action. Nous avons décidé de créer un bureau pour contribuer à gérer le pôle Elsa de façon concertée avec une structuration en « collèges ». Comme décrit dans sa charte : « ELSA (research group for Environmental Life cycle Sustainability Assessment, www.elsa-lca.org) est issu du rassemblement, en région Languedoc Roussillon, de chercheurs, ingénieurs et enseignants, tous spécialistes de l'évaluation environnementale ou de l'écologie industrielle appliquées prioritairement aux agro-bio-procédés ». Les missions d'ELSA sont la formation, l'animation scientifique, la production scientifique commune, l'interaction avec les industriels et la communication vers l'extérieur. ELSA se définit comme un groupe d'animation scientifique de proximité qui s'accompagne d'une liste de discussion et d'information ouverte à tous. Le pôle Elsa a connu une croissance exponentielle en nombre de membres au cours des 3 dernières années (plus de 30 membres aujourd'hui). Le pôle a aujourd'hui acquis une visibilité nationale et accroît de conférence en conférence sa visibilité et sa reconnaissance internationales. Il est positionné depuis le début sur des champs disciplinaires très pionniers tels que l'ACV sociale ou l'inclusion de l'impact de l'eau dans les ACV. Je suis la représentante du CIRAD au sein du bureau d'ELSA et participe ainsi aux décisions stratégiques de ce pôle, et aux réflexions sur l'évolution de son statut.

1.3.2. Contribution à l'animation du thème ACV au CIRAD

Organisation d'une école chercheurs sur l'ACV des produits tropicaux

Le renforcement des compétences internes du CIRAD sur cette thématique nouvelle est passé selon le souhait de la direction du département PERSYST par l'organisation d'une école chercheurs. Dès mon embauche au CIRAD, j'ai été chargée de cette mission pour laquelle j'ai été appuyée par l'assistante de mon unité et par une personne travaillant à la valorisation scientifique sur l'ingénierie pédagogique. Un appui a également été apporté par deux collègues du CIRAD pour filmer les interventions et les restituer sur le site internet de la formation du CIRAD. Cette école chercheurs intitulée : « LCA applied to tropical agri-food products », s'est déroulée du 1^{er} au 5 Mars 2010 à Sète.

J'ai conçu le programme de l'école chercheurs de façon à couvrir l'ensemble des grands fronts pionniers du sujet de l'évaluation environnementale des produits agricoles en général et tropicaux en particulier et j'ai mobilisé 13 experts internationaux sur ces thématiques. Sur 25 participants, l'effectif majoritaire était « ciradien » incluant des collègues expatriés rentrés pour l'occasion mais aussi issus d'autres organismes locaux (collègues ELSA) ou français (INRA de Rennes, instituts techniques). Cet événement organisé en résidence dans un hôtel à Sète a permis au-delà de l'actualisation de nos connaissances scientifiques de renforcer notre réseau national et international.

Analyse du besoin et proposition d'un dispositif de cohésion interne, de mutualisation et de valorisation des connaissances et données CIRAD

A mon arrivée au CIRAD, j'ai par ailleurs proposé au directeur du département PERSYST mon analyse des potentialités de développement de l'ACV avec l'idée que le CIRAD possédait une « mine » de données agronomiques, économiques et agri-environnementales qui pouvait être valorisée sous la forme de modèles et d'études ACV publiables le cas échéant. Dans ce cadre j'ai proposé les actions suivantes :

- Recrutement d'un ingénieur en bases de données ACV à vocation transversale auprès de la direction PERSYST
- Mise en place d'un dispositif de 7 licences du logiciel de modélisation ACV (SIMAPRO) mutualisées (accessibles depuis l'étranger) et centrées sur la gestion d'une base de données unique et transversale au CIRAD.

Grâce au soutien du département PERSYST, ces deux actions ont pu être réalisées. L'ingénieur bases de données ACV Yannick Biard a été recruté en 2010 et accueilli dans mon unité dans laquelle j'assure son encadrement avec l'appui des collègues ACV des autres unités. La création de la base de données offre un potentiel considérable de mutualisation des efforts de collecte et de formalisation des données au sein du CIRAD qui sert autant à la réalisation de travaux de recherche, de prestations privées ou de publications scientifiques. La base de données fait aujourd'hui l'objet d'une charte et d'une démarche qualité mises en place par Yannick Biard. Ce dernier a également fait déposer la base de données à l'Agence de Protection des Programmes. Les compétences et outils développés par Yannick Biard font aujourd'hui partie des points forts du CIRAD dans son offre de collaboration avec l'INRA dans le cadre de la plate-forme MEANS. Son action renforce considérablement le dialogue et la cohésion entre les unités du CIRAD qui travaillent sur l'ACV.

Coordination de la préparation de papiers de revue critique impliquant différentes unités du CIRAD

A mon arrivée au CIRAD, j'ai coordonné la rédaction d'un papier de revue bibliographique sur l'ACV des produits tropicaux animaux et végétaux impliquant 7 unités différentes. Ce travail a été accepté pour une présentation orale à la conférence internationale LCA Food de Bari (Italie) en 2010 (Basset-Mens et al. 2010). Sur les produits végétaux, ce travail a ensuite été repris et divisé en deux travaux plus approfondis de revue bibliographique : l'un sur l'ACV des produits maraîchers (Perrin et al. 2014a) et l'autre sur l'ACV des produits issus de systèmes pérennes. Suite à mon départ en congés maternité fin 2011, le leadership de la rédaction de ce papier a été repris efficacement par ma collègue Cécile Bessou et il a pu être accepté pour publication en 2012 (Bessou et al. 2013).

1.3.3. Montage de projets de recherche en partenariat sur l'ACV des systèmes de production

Rédaction de projets de recherche et obtention de financements publics et privés avant mon entrée au CIRAD

C'est en Nouvelle Zélande que j'ai eu l'occasion de rédiger mes premiers projets de recherche, de répondre à des appels d'offre sur mes thématiques de recherche et d'exercer la fonction de chef de projet. J'ai personnellement obtenu un financement de l'organisation pour la recherche dans le secteur de la laine NZ (Wool Research Organisation of New Zealand) pour la réalisation d'une étude ACV comparée des moquettes de laine et de nylon. Comme déjà évoqué brièvement, j'ai également eu la chance de pouvoir répondre avec mes collègues et participer avec plusieurs autres instituts de recherche (SCION, NZ ; University of New South Wales, Australia) à un projet de recherche appliquée, lancé et financé intégralement par la coopérative laitière de Nouvelle Zélande Fonterra sur l'empreinte carbone de ses produits depuis leur fabrication jusqu'à leur mise en marché. Dans cet appel d'offre international très compétitif, Fonterra avait choisi de confier à notre équipe à AgResearch la responsabilité de la modélisation de la phase agricole. J'ai par ailleurs soumis et obtenu avec une petite équipe pluridisciplinaire un financement de la fondation de recherche des sciences et techniques NZ (FRST) sur le développement méthodologique de l'ACV sociale appliquée au cas du lait NZ. Rédigées en anglais dans un contexte institutionnel et un système de financement de la recherche très différents du système français, ces projets et leur gestion ont été autant d'expériences extrêmement fructueuses pour moi.

De retour en France, embauchée au Cemagref, j'ai notamment participé avec trois collègues à une mission de préfiguration sur l'empreinte eau pour la société Danone. Basée sur une analyse bibliographique et bibliométrique exhaustive de la thématique cette étude avait pour but d'aider les cadres scientifiques de Danone à construire leur compréhension du sujet sur le plan conceptuel et méthodologique et à mieux s'engager dans la dynamique de développement d'indicateurs sur ce thème au niveau international.

Rédaction de projets de recherche depuis mon arrivée au CIRAD

A mon arrivée au CIRAD, j'ai fourni un gros effort de rédaction et de montage de projets de recherche sur l'ACV des produits horticoles et tropicaux dont une bonne part a été couronnée de succès. Les « guichets » ont d'abord été français (ADEME, ODEADOM, ANR) et européen (FP7) et concernaient des filières d'exportation de produits agricoles tropicaux pour le marché français et européen. La demande d'études était forte en effet dans le contexte réglementaire du Grenelle de l'environnement pour des études ACV sur les produits importés. Aujourd'hui, ma recherche de financements se tourne plus vers des initiatives (africaines ou pas) au service de la recherche appliquée et du développement en Afrique (thèse Aurélie Perrin sur le maraîchage urbain en Afrique, SURFOOD, Europaid Tanzanie, projet en cours de finalisation sur le maraîchage urbain au Niger). Cette nouvelle orientation s'intéresse plus aux filières horticoles locales pour nourrir les populations du sud. Je décris brièvement ci-dessous l'essentiel de ces projets.

Projet ANR FLONUDEP (2010-2013)

J'ai apporté un appui à l'Institut Agronomique Méditerranéen (IAM) pour le montage du projet ANR FLONUDEP sur l'évaluation de la durabilité des filières fruits et légumes. J'ai apporté ma contribution à la conception d'ensemble du projet dont le cadre conceptuel et intégrateur retenu a été l'analyse de cycle de vie. J'ai également rédigé et pris la responsabilité d'un « work package » sur l'évaluation environnementale des filières choisies. J'y étais responsable scientifique du CIRAD dont 3 unités étaient impliquées. Le financement CIRAD pour ce projet était de 162 000 euros.

Projet Agribalyse (2010-2013)

J'ai participé dès le début à la concertation avec les différents experts ACV français et Suisse sur le sujet de l'ACV des produits agricoles pour concevoir un projet de recherche sur l'évaluation environnementale d'un panel de produits agricoles consommés en France. J'ai rédigé et coordonné la contribution CIRAD (quatre unités impliquées) sur l'ACV de 6 produits importés consommés en France. Je représentais le CIRAD dans les différents comités (pilotage, consultation, stratégique) et faisais le lien entre les décisions des comités et la réalisation de nos travaux afin d'assurer la meilleure cohérence possible avec les filières françaises. Ce projet sur 3 ans bien qu'assez peu rémunérateur (100 000 euros en tout) et très exigeant a représenté une opportunité de collaboration précieuse avec les meilleurs spécialistes Français et Suisse et a contribué à consolider et à faire reconnaître notre petite équipe CIRAD. Pendant mon congé maternité, j'ai été remplacé sur ce projet par Sandra Payen et Cécile Bessou.

Bourses de thèse

Rédaction et obtention d'une bourse de thèse 100% CIRAD sur le thème de la prise en compte de la variabilité du sol, du climat et des pratiques dans l'ACV des produits maraîchers avec le cas de la tomate du Bénin (thèse Aurélie Perrin 2010-2013).

Rédaction avec l'aide significative de la doctorante Sandra Payen et obtention d'une demie bourse de thèse CIRAD et d'une demie bourse de thèse ADEME sur le thème de la prise en compte des impacts liés aux usages d'eau douce avec une mise en œuvre à un produit horticole (2012-2015).

Projet Duralidom (ODEADOM) (2011-2012)

J'ai répondu avec plusieurs collègues CIRAD, un professeur de l'université et un consultant, à un appel d'offre de l'ODEADOM sur l'évaluation de la durabilité des filières alimentaires des DOM avec une visée comparative entre les filières locales et les filières importées. L'appel d'offre portait sur une évaluation conjointe des dimensions de la durabilité à la fois environnementale et socio-économique. Il était également prévu de couvrir une filière animale et une filière végétale. L'ingénieur bases de données nouvellement recruté après l'obtention de ce financement est devenu chef de projet pour l'évaluation environnementale de la filière végétale. Le budget était de 250 000 euros sur 10 mois dont notamment 7 mois de travail financé pour l'ingénieur.

Projet soumis Europaid – HIGH – Tanzanie (Eté 2014)

Sous l'impulsion et la coordination de Rémi Kahane, j'ai participé à la concertation et à la rédaction d'une réponse à l'appel d'offre EUROPAID – 10th European Development Fund, en partenariat avec

l'association de producteurs horticoles de Tanzanie : TAHA. Nous proposons une prestation en interaction avec nos collègues agronomes et économistes sur la formation et l'encadrement d'étudiants tanzaniens pour la réalisation de plusieurs ACV comparatives fruits et légumes. Le budget total CIRAD devrait être de l'ordre de 200 000 euros sur 3 ans. La réponse est attendue à l'automne.

Projet à soumettre en cours de maturation

Avec un collègue nigérien de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (Rabani Adamou) et plusieurs collègues de l'unité : Joël Huat, Laurent Parrot, Thibaud Martin, Serge Simon, je participe à la rédaction d'un projet sur l'évaluation et l'amélioration des pratiques des producteurs maraîchers de la vallée du Niger. Nous souhaitons faire financer dans ce cadre plusieurs projets de thèse et de masters. Ce projet représente l'axe 1 de mon projet scientifique dans la partie 3 de ce document.

Rédaction de projets non financés

Le montage de plusieurs projets n'a pas abouti mais a contribué à mûrir nos thématiques scientifiques et nos partenariats :

- un projet européen (FP7) baptisé « Eco-Alcúe » sur l'évaluation environnementale et sociale des produits d'export depuis l'Amérique latine vers l'Europe,
- un projet soumis pour financement au RTRA (Agropolis fondation) sur la création d'une plateforme multidisciplinaire sur la conception de filières de production durables en horticulture
- et le projet SURFOOD, projet ambitieux coordonné par Nicolas Bricas sur l'alimentation des villes dans lequel je n'ai pris qu'une part très modeste.

2. Synthèse des travaux scientifiques

Je présente dans ce chapitre une synthèse illustrée de mes travaux scientifiques. Je reviendrai au début du chapitre 3 sur les principaux acquis et enseignements des recherches les plus récentes menées sur les systèmes horticoles au sud. Tout au long de ce document, l'horticulture désigne la production de fruits et de légumes (systèmes maraîchers, fruitiers, mixtes) quels que soit la taille du système de culture, son mode de production et sa complexité.

2.1. Contexte, enjeux et questions scientifiques

Dans un contexte de crise sociale et environnementale, l'ACV s'impose comme méthode d'évaluation globale

Parmi les grandes fonctions nécessaires aux communautés humaines, la réalisation de la fonction alimentaire (et agricole) est responsable d'une très grande part de leurs impacts. Sur le plan environnemental, ceux-ci touchent à la fois l'air, les sols et les eaux. De plus, la pression sur les milieux et les ressources va continuer de s'accroître si l'on veut parvenir à nourrir une population mondiale grandissante estimée à 9 milliards d'individus en 2050. Dans ce contexte de crise, le besoin de cadres conceptuels et d'outils d'évaluation est unanimement reconnu dans les pays dits développés d'Europe et d'Amérique du Nord et de plus en plus dans les pays en croissance comme en Asie ou en Amérique Latine. Parmi les méthodes mises au point au cours des dernières décennies, une méthodologie s'impose de manière de plus en plus affirmée : l'Analyse de Cycle de Vie.

L'analyse détaillée de ce contexte global est proposée par Basset-Mens et al. (2009c). Dans cet article, une analyse des multiples définitions de la durabilité et de leur convergence avec le référentiel de valeurs sur lequel est construit la méthodologie ACV sont également proposés. Il est notamment montré que les définitions actuelles de la durabilité présentent un spectre plus large à la fois en termes de dimension environnementale et de dimension sociale que le référentiel de la méthodologie ACV. Un état de l'art de la mise en œuvre de l'ACV pour les fonctions alimentaires sur l'ensemble des dimensions de la durabilité (environnementale, sociale et économique) permet ensuite d'identifier les défis scientifiques principaux pour faire de l'ACV un outil complet et efficace pour identifier les options les plus durables de production alimentaire. L'article insiste notamment sur l'importance de développer des indicateurs spatialisés pour les catégories d'impact environnemental régionales et des indicateurs d'impacts pour les dimensions sociales et économiques.

Décrite par deux normes ISO (14040 et 14044), l'ACV est une procédure en 4 étapes (Figure 2). Son développement méthodologique est aujourd'hui porté par une vaste communauté de scientifiques, de consultants et d'industriels de par le monde. Les travaux de cette communauté sont organisés et soutenus par différentes instances telles que les initiatives conjointes du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et de la SETAC (Société savante de toxicologie et de chimie) sur l'ensemble des défis scientifiques de la méthode. L'Union Européenne ("European Food Sustainable Consumption and Production Round table" (<http://www.food-scp.eu/>); "Product environmental Footprint" (http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/product_footprint.htm) et certains pays comme la France (Loi Grenelle 2) appliquent une politique volontariste en matière de production et de consommation durable encourageant notamment l'affichage environnemental de tous produits basé sur l'utilisation de l'ACV.

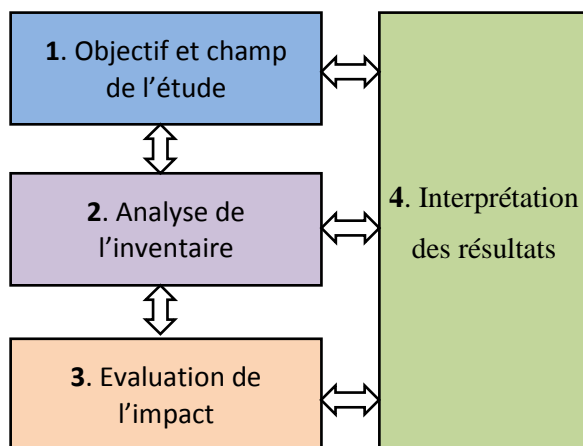


Figure 2. Les 4 étapes de l'Analyse du Cycle de Vie

Des travaux scientifiques et méthodologiques ont permis d'analyser et comparer les différentes méthodes d'évaluation existantes et l'influence des différents choix méthodologiques sur les résultats d'impact des systèmes. L'ACV a été mise en avant pour sa pertinence scientifique et conceptuelle (van der Werf et Petit, 2002 ; Payraudeau et van der Werf, 2005).

L'article de van der Werf et al. (2006) auquel j'ai contribué explore l'influence du choix de la méthode d'évaluation sur le classement des systèmes étudiés et fait des recommandations sur le choix de la méthode la plus adaptée selon les objectifs de l'étude. En utilisant 5 méthodes d'évaluation bien formalisées pour classer 3 scénarios de production de porc (conventionnel, label rouge et biologique), les auteurs concluent à un effet considérable de la méthode et de l'unité fonctionnelle choisies sur le classement des systèmes. Ils recommandent l'usage de méthodes permettant d'exprimer les résultats à la fois par unité de produit et par unité de surface utilisée. Ils recommandent aussi aux utilisateurs la plus grande précaution dans le choix d'une méthode d'évaluation en fonction de leurs objectifs.

A la figure 3, est proposée une figure schématique de la procédure ACV incluant les aires de protection actuelles.

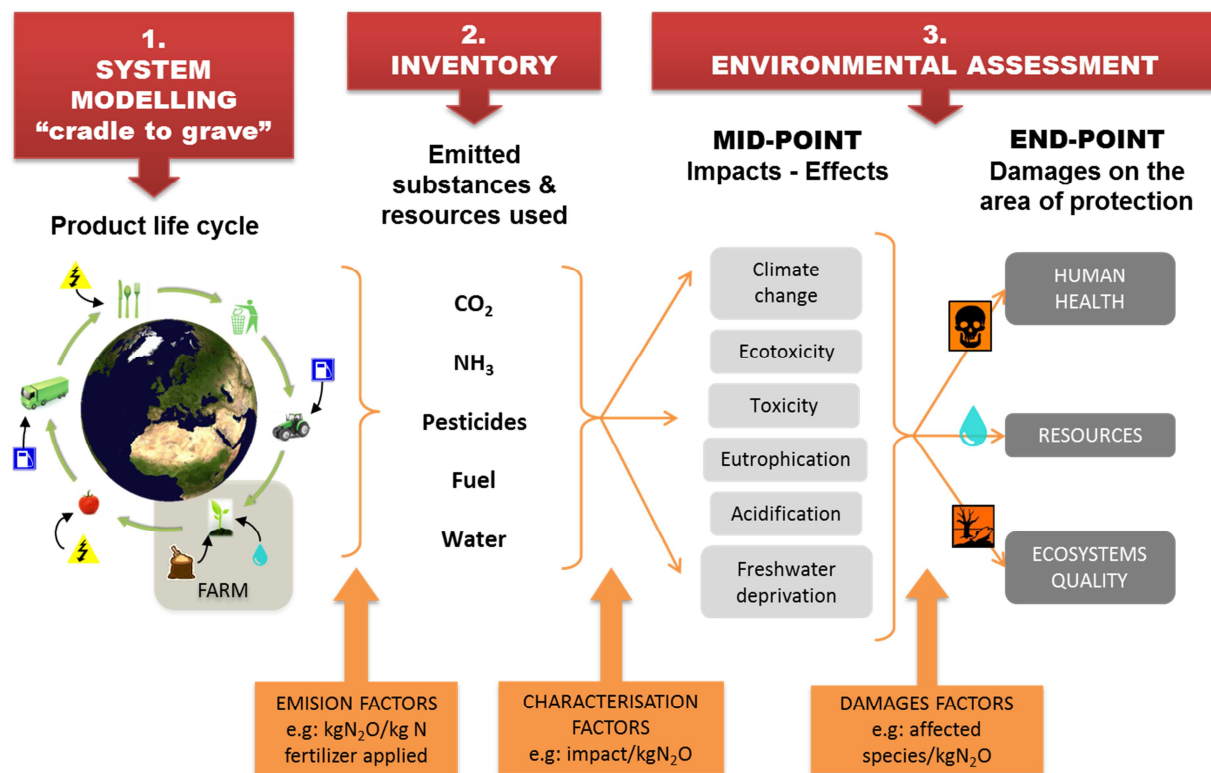


Figure 3. Présentation de la procédure ACV (schéma Sandra Payen) depuis la définition du système étudié jusqu'à la conversion des impacts environnementaux pour chaque aire de protection.

Les grands atouts de la méthodologie ACV sont de mieux en mieux partagés et compris. Evaluation globale comparée de différentes alternatives techniques pour remplir une fonction donnée sur l'ensemble des impacts environnementaux d'importance, elle repose sur un inventaire quantitatif de tous les flux entrants et sortants du système sur tout son cycle de vie. La conversion des données d'inventaire en impacts est exprimée par unité fonctionnelle, unité représentative du service rendu ou de la fonction étudiée. Par exemple, les deux unités fonctionnelles les plus employées en ACV des systèmes agricoles sont le kilogramme de produit et l'hectare de surface utilisée. Par son approche globale, l'ACV permet de mettre en évidence d'éventuels transferts de pollution soit entre étapes du cycle de vie soit entre catégories d'impact. Par exemple, la mise au point d'une technologie de production moins polluante au stade industriel peut impliquer l'usage de matériaux très difficiles à recycler et dont la fin de vie sera très polluante. L'ACV permet de mettre en évidence le transfert d'impact entre la phase de production et la phase de fin de vie. Elle permet également d'identifier les points forts et les points faibles des systèmes où faire porter les efforts d'amélioration.

J'ai proposé avec Hayo van der Werf une présentation relativement vulgarisée de la méthodologie ACV avec une illustration et une liste de questions auxquelles l'ACV peut permettre de répondre dans un article publié dans la revue en ligne Encyclopedia of earth (Basset-Mens et al. 2007).

Appliquer l'ACV aux produits agricoles reste un défi !

Les systèmes de production agricole diffèrent des systèmes de production industrielle en plusieurs points qui rendent l'application de l'ACV beaucoup plus difficile.

Ils présentent généralement une grande variabilité et de multiples fonctions (production d'aliments ou d'autres biens, occupation du territoire et entretien des paysages, emploi, revenu...). De plus, le sol a un statut généralement mixte c'est-à-dire qu'il appartient à la fois au système étudié (ou technosphère en ACV) et à l'environnement (écosphère). Ceci rend la définition de l'émission problématique puisque l'émission est le flux qui quitte le système (technosphère) pour aller dans l'environnement (écosphère). Par ailleurs, de par la nature très imbriquée de ces systèmes dans leur environnement, les pollutions sont de nature diffuse et éminemment variable. Enfin, les impacts prépondérants de ces systèmes sont souvent régionaux ou locaux et difficiles à modéliser en ACV. La modélisation de ces impacts reste pour beaucoup d'entre eux encore en construction voire en débat. On citera l'occupation de terre (« land use ») dont la dimension qualitative reste peu ou pas prise en compte (qualité des sols, biodiversité, production de biomasse....) et les impacts liés à la consommation d'eau douce. Les modèles d'impact pour la toxicité humaine et l'écotoxicité présentent également une grande incertitude. Enfin, d'autres dimensions qui peuvent être importantes socialement dans certaines régions ne sont pas prises en compte : les paysages, le bien-être animal, les odeurs... La dimension sociale fait depuis quelques années l'objet de travaux de recherche dont une première réalisation importante a été la thèse de Pauline Feschet accueillie par l'unité 26 : banane plantain ananas du CIRAD (Feschet, 2014).

Pour plus de détail sur ces grands défis et particularités de l'application de l'ACV aux systèmes de production agricole, on peut se référer à plusieurs analyses détaillées proposées notamment dans Basset-Mens et al. (2009) et dans les introductions des thèses de Basset-Mens (2005), Langevin (2010) et Perrin (2013).

L'application de l'ACV aux produits tropicaux en général et aux fruits et légumes en particulier apporte un renouveau des questions scientifiques.

Tous les défis scientifiques cités ci-dessus s'appliquent aux systèmes de production tempérés comme tropicaux. Cependant, ils se posent avec une acuité particulière dans les régions tropicales des pays en développement, en lien avec la spécificité des enjeux humains et environnementaux de ces régions. Beaucoup des systèmes tropicaux, d'une très grande variabilité, sont en effet gagnés sur ou en interaction avec des zones naturelles peu ou pas cultivées. Dans ces zones, les sols et les climats peuvent présenter une grande vulnérabilité et les connaissances, les expertises et les modèles sont rarement disponibles et moins bien formalisés qu'en contexte tempéré.

Deux de nos articles de revue bibliographique récents ont permis d'analyser et préciser ces enjeux scientifiques d'une part sur l'ACV des produits maraîchers (Perrin et al. 2014a) et d'autre part sur l'ACV des produits issus de systèmes pérennes (incluant les fruitiers) (Bessou et al. 2013). Ces deux revues mettent l'accent sur la modélisation du stade agricole en tant qu'étape la plus complexe et contribuant à une grande part des impacts environnementaux. Une représentativité insuffisante dans l'espace et dans le temps des jeux de données utilisés pour décrire les systèmes étudiés est constatée qu'ils soient à cycle court comme en maraîchage ou à cycle long comme les systèmes pérennes. L'inadéquation des méthodes employées pour l'estimation des flux au champ et le manque de transparence et de renseignement des paramètres clés des systèmes et des méthodes sont également mis en évidence (Perrin et al. 2014a ; Bessou et al. 2013).

Les deux revues recommandent (1) de mieux intégrer la variabilité spatiale et temporelle des systèmes horticoles au travers de méthodes de typologie et d'échantillonnage adéquates, (2) d'inclure tous les flux importants en termes de nutriments, de pesticides, d'eau et d'évaluer leurs impacts associés et (3) d'employer les meilleures méthodes disponibles ou si possible des modèles mécanistes pour l'estimation des émissions au champ.

Il est par ailleurs important pour évaluer les systèmes pérennes de modéliser l'ensemble de leurs phases : immature, croissance, pleine production et le cas échéant décroissance et de travailler avec des jeux de données pluriannuels afin de prendre en compte les phénomènes d'alternance (Bessou et al. 2013).

Une formalisation des meilleures méthodes disponibles pour estimer les flux sous culture maraîchère est également proposée (Perrin et al. 2014a).

2.2. Les grandes questions scientifiques traitées

Au cours de mes douze années d'expériences de recherche sur l'ACV, j'ai travaillé sur les fonctions de systèmes de production très contrastés aussi bien animaux (porc, lait, laine, viande ovine et bovine) que végétaux (cultures annuelles tempérées, prairies pérennes, maraîchage en Afrique, fruitiers en zones semi-aride et tropicale). Avec l'aide des personnes qui m'ont encadrée et de celles que j'ai encadrées, notamment mes trois doctorantes : Brigitte Langevin, Aurélie Perrin et Sandra Payen, j'ai pu traiter au travers de ces cas d'études plusieurs questions génériques sur l'application de l'ACV aux systèmes de production agricole :

Q1 : Comment concevoir et décrire des systèmes de production représentatifs de la fonction étudiée par l'ACV ?

Q2 : Comment produire un inventaire quantitatif des flux (au champ et à l'atelier de production animale) tenant compte des pratiques et du contexte environnemental (sol, climat)

Q3 : Comment modéliser les impacts régionaux tels que l'eutrophisation aquatique, la privation d'eau douce, la salinisation ?

Q4 : Quelles connaissances nous apportent les évaluations par l'ACV sur la performance environnementale et agronomique des systèmes étudiés ?

Q5 : Comment quantifier l'incertitude des résultats et la prendre en compte dans le processus de décision ?

2.3. Concevoir des systèmes représentatifs d'une fonction d'ACV : prise en compte de la variabilité et de la diversité spatiale et temporelle des systèmes étudiés

L'ACV s'intéresse à l'évaluation de la ou des fonctions remplies par un système de production. Une fois cette fonction définie, la population de systèmes productifs (systèmes de culture, usines...) qui remplit cette fonction doit être identifiée, et dans l'idéal caractérisée dans sa diversité et prise en compte dans la conception d'un système représentatif.

Les questions posées à l'ACV sont souvent des questions ayant une portée à grande échelle comme la comparaison de deux origines de tomate pour le marché français ou bien la comparaison de deux modes de production de lait dans une région donnée. La fonction est donc réalisée par un cumul de systèmes productifs répartis sur un espace plus ou moins éclaté au cours d'une période plus ou moins longue et présentant une diversité et une variabilité plus ou moins grandes. Si la pratique ACV a rarement donné toute son importance à cette étape de caractérisation et d'échantillonnage des systèmes productifs remplissant les fonctions étudiées, il apparaît de plus en plus clair que cette lacune doit être corrigée car elle conduit à des incertitudes majeures dans les résultats d'ACV. Les outils de l'agronomie tels que la typologie, l'échantillonnage, peuvent nous aider dans cette tâche.

De plus, les différentes alternatives techniques qui remplissent la même fonction (par exemple un porc peut être produit de façon conventionnelle ou biologique) ne présentent pas forcément le même niveau de maturité (la production biologique est encore à un stade expérimental) ni la même disponibilité en données. Il faut alors mettre au point des stratégies de conception de systèmes prospectifs cohérents et comparables avec les systèmes plus courants et mieux renseignés.

Les guides de bonnes pratiques ACV tels que l'ILCD (International Reference Life Cycle Data System) proposé par le centre de recherche IES (Institute for Environment and Sustainability) de la commission européenne demandent aujourd'hui qu'une évaluation de la qualité des données d'inventaire soit réalisée par rapport aux objectifs de l'ACV, selon une grille de critères incluant la représentativité technologique, géographique, temporelle, la complétude des flux pris en compte, la précision et l'incertitude et l'adéquation de la méthode utilisée et la cohérence. Ces indices de qualité des données d'inventaire peuvent être convertis en informations statistiques pour chaque jeu de données en vue d'une éventuelle analyse d'incertitude de type simulation Monte-Carlo.

Au cours de mes travaux, j'ai eu l'occasion de tester différentes approches pour concevoir des systèmes représentatifs des fonctions étudiées en ACV, approches devant combiner les objectifs de l'étude avec la disponibilité des données et connaissances sur les systèmes étudiés.

2.3.1. L'ACV des produits animaux en zone tempérée : statistiques et expérimentations

Basset-Mens et van der Werf (2005) ; Basset-Mens et al. (2009a).

Pour mes travaux sur les systèmes de produits animaux en France et en Nouvelle Zélande, l'objectif de nos ACV était de comparer les impacts environnementaux par unité de service rendu (ou unité fonctionnelle) pour différentes alternatives techniques dans un contexte où les effets néfastes du système conventionnel commençaient à être mis en évidence. Le renseignement des performances des systèmes conventionnels les plus courants (rendement des cultures, des prairies, performance

des animaux) a reposé sur des données statistiques fiables incluant moyenne et écart-type. Concernant les intrants utilisés (dose, nature, origine), des bases de données d'entreprises privées (fabricants d'aliments pour bétail par exemple), d'association de producteurs (exemple du groupement de producteurs des porcs label rouge d'Argoat) ou encore de réseaux de fermes suivies par des centres techniques (comme le centre Dexcel sur le lait en Nouvelle Zélande) ont pu être mobilisés parfois moyennant la signature d'un contrat de confidentialité. L'usage de deux sources d'information différentes pour les intrants d'une part et les sortants d'autre part introduit un biais dans le calcul de l'éco-efficience (ou impact par unité fonctionnelle tel qu'un kg de viande ou de lait). Il est donc important de tester l'effet de ce biais sur les résultats ou mieux de le corriger en utilisant des données d'intrants exprimés par unité produite dans les bases de données de suivi technique et de les extrapoler au système moyen. Sur les systèmes alternatifs étudiés tels que le porc bio ou différents niveaux d'intensification pour le lait NZ, ces données statistiques et ces bases de données techniques n'existaient pas. Pour le porc bio, on s'est appuyé sur un modèle de production raisonnée proposé par un expert et ajusté par d'autres experts. La variabilité des données a également dû être estimée à dire d'expert. Les trois scénarios de production de porc ont donc été construits avec des pratiques raisonnées et non sur des pratiques courantes ou extrêmes ce qui a facilité leur comparabilité. Pour les différents niveaux d'intensification de ferme laitière NZ, on s'est appuyé sur une expérimentation à petite échelle où toutes les données d'intrants et de performance avaient été mesurées sur 3 ans. Ces données ont été extrapolées à l'échelle d'une ferme réelle pour comparer avec la ferme moyenne NZ.

On peut considérer que ces études ACV ont été réalisées dans les meilleures conditions possibles et pourtant même la description des systèmes courant conventionnels a impliqué le recours à différentes sources de données induisant potentiellement des biais. De plus, l'étude de systèmes alternatifs ou prospectifs implique le recours à l'expertise ou à des expérimentations à petite échelle dont l'extrapolation comporte une incertitude. La comparaison de systèmes ayant des niveaux de maturité technologique différents (technologie la plus répandue par rapport à une technologie innovante) reste délicate et conduit forcément à une incertitude. Dans ce cadre, l'usage d'analyses de sensibilité aux paramètres clés et idéalement d'analyses d'incertitude est incontournable pour tester la robustesse des résultats (cf. section 2.7).

2.3.2. L'ACV des produits horticoles au sud : le retour à la ferme !

Perrin et al. (2014b) ; Payen et al. (2014a) ; Basset-Mens et al. (2014) ; Bessou et al. (2014)

Dans le cadre de nos travaux d'ACV sur les produits horticoles au sud, nous avons travaillé sur des cas d'étude contrastés avec un objectif commun : celui de caractériser et évaluer des systèmes représentatifs de la fonction étudiée. Dans les projets Agribalyse et FLONUDEP, l'objectif était d'évaluer des fruits et légumes importés sur le marché français : les petits agrumes du Maroc (Agribalyse), la mangue de la vallée du San Francisco au Brésil (Agribalyse), la tomate du Maroc (FLONUDEP). Dans le cadre de la thèse d'Aurélien Perrin, l'ambition était de parvenir à évaluer un système moyen représentatif de la fonction d'approvisionnement en tomate des villes du sud Bénin mais aussi d'en explorer la diversité et l'effet de cette diversité sur les impacts. Pour atteindre ces objectifs, la question critique est celle de la disponibilité et de la qualité des données. Dans un contexte de pénurie de données, il est difficile pour le chercheur et le praticien d'ACV de pouvoir prendre en compte toute la diversité du système étudié. En respectant les moyens alloués, on

cherche à renseigner la plus grande part de la diversité du système étudié en ayant recours à l'expertise, à des méthodes de typologie et d'échantillonnage.

Sur l'ensemble de nos cas d'étude, nous avons rencontré un gradient de situations en terme de disponibilité en données : depuis la disponibilité de quelques données statistiques pour les productions d'agrumes et de tomate au Maroc jusqu'à l'inexistence totale de données formalisées même à la ferme comme sur la tomate des jardins urbains au Bénin. Entre ces deux situations extrêmes, on trouve des situations où des données existent à la ferme (souvent au format papier et très désagrégé : apport d'un pesticide le jour j) mais doivent être collectées au travers d'enquêtes de terrain très lourdes comme pour la mangue de la vallée du San Francisco au Brésil. Je présente ci-dessous les stratégies mises en œuvre en termes de collecte de données pour atteindre les objectifs de chaque étude.

Concernant les situations les plus favorables en disponibilité en données que représentent les productions d'agrumes et de tomate pour l'export au Maroc il faut distinguer les cultures maraîchères à cycle court des cultures de fruitiers à cycle pluriannuel. Un développement particulier est proposé sur la modélisation des systèmes pérennes en ACV à la section 2.3.3.

Dans le cas des cultures maraîchères d'export comme la tomate qui sont des systèmes assez standardisés, un échantillonnage sur trois fermes sur trois années a été réalisé dans la principale région de production par Sandra Payen lors de son stage de fin d'étude. Les données agronomiques moyennes de l'échantillon ont été discutées au travers de dires d'expert et les résultats ont fait l'objet d'une analyse de sensibilité aux paramètres clés tels que les rendements. Sur agrumes, la stratégie a été différente et a dû se faire en deux temps. Un premier travail fin sur une seule exploitation réelle a permis de collecter des données détaillées sur toutes les opérations culturales sur l'ensemble du cycle du verger (25 ans) par Hadrien Heitz lors de son stage de fin d'étude. Ensuite, des données statistiques et le recours aux dires de plusieurs experts marocains de cette production ont permis la mise au point d'un scénario moyen représentatif de la production destinée à l'export en se focalisant sur les paramètres agronomiques majeurs. Les données de moindre importance ont reposé sur l'enquête détaillée préalable. Cette seconde mission a été réalisée par Hadrien Heitz dans le cadre d'un CDD co-encadré avec Henri Vannière.

L'étude ACV sur la mangue de la vallée du San Francisco, système assez standardisé lui aussi, a représenté un très lourd travail de terrain à cause du caractère pérenne de cette culture et malgré l'existence de données formalisées sur les fermes. Un échantillon de 8 fermes a pu être enquêté sur plusieurs semaines par Angela Braün dans le cadre de son stage de fin d'étude, co-encadré par Sandra Payen et Henri Vannière. L'enquête a combiné des données écrites à la main, photographiées et saisies par la stagiaire, des données informatisées et des compléments par oral des chefs d'exploitation et techniciens. Compte tenu des nombreuses données manquantes sur l'ensemble du cycle du verger, seul un système moyen agrégeant année par année sur les 8 vergers toutes les données disponibles a pu être calculé. La variabilité interne à l'échantillon n'a donc pas pu être explorée. De plus, une difficulté particulière a été rencontrée pour la description des pratiques phytosanitaires qui font l'objet d'une grande variabilité notamment en lien avec les molécules utilisées, mais aussi d'une certaine discrétion de la part des producteurs souvent inquiets du résultat de nos évaluations et qui ne fournissent pas toujours la totalité des informations. Bien sûr ces

difficultés malgré le fort investissement dans la collecte des données entachent d'incertitude les résultats d'impact calculés en particulier les résultats de la toxicité.

Pour finir, dans le cadre de la thèse d'Aurélie Perrin, nous avons été confrontées à une situation de pénurie extrême en données. S'appuyant sur plusieurs partenaires locaux et sur l'expertise de collègues du CIRAD, Aurélie a réalisé une typologie des systèmes de production de tomate en jardin urbain au Bénin. Cette typologie lui a permis de réaliser un échantillonnage optimal de 12 parcelles représentant au mieux l'ensemble des types pré-identifiés, 12 étant le nombre maximal de parcelles pouvant être suivies dans le cadre de sa collecte de données d'inventaire. La collecte ou plutôt la création des données d'inventaire a reposé sur la mobilisation d'un stagiaire sur 6 mois (Wilfried Yehouessi) et de plusieurs techniciens locaux. Elle a consisté en deux étapes : une première étape de description des opérations culturales avec le producteur sur toute la durée de la culture puis une deuxième étape de conversion de ces opérations en quantités physiques de chaque intrant exprimées en unités conventionnelles (et non en capsules de bouteilles ou en poignées de main du producteur). Si la lourdeur de la création de ces données a limité la taille de l'échantillon à 12 parcelles, le passage par une typologie préalable et la fiabilité des données ainsi produites ont permis d'assurer une représentativité et une fiabilité satisfaisantes des résultats d'inventaire et d'ACV obtenus et ces travaux ont été publiés dans la revue ASD. Le processus de typologie et d'échantillonnage est schématisé à la figure 4.

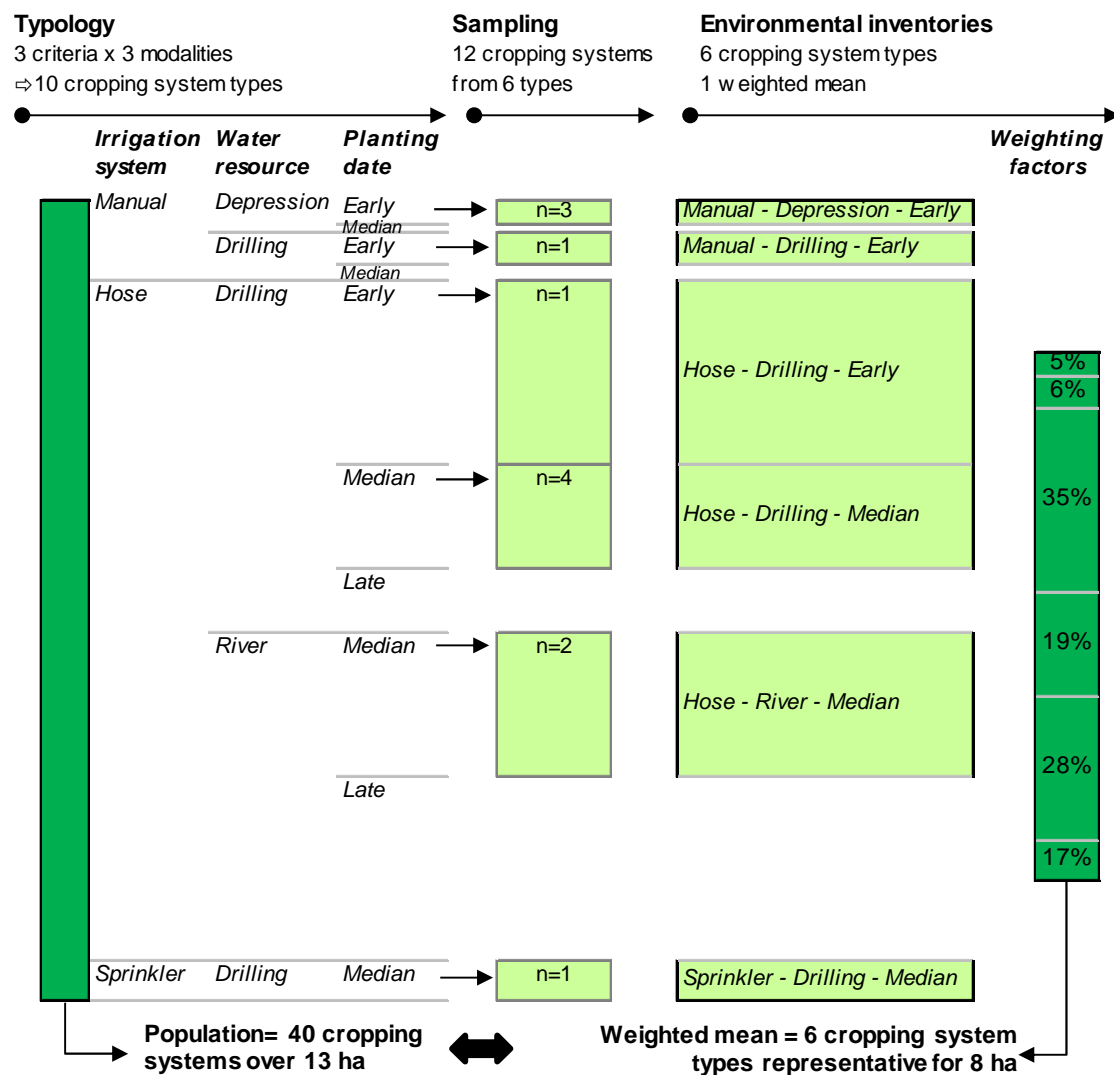


Figure 4. Representative environmental inventories for out-of-season tomato cropping systems in studied urban areas in Benin (2011-2012 - Cotonou, Ouidah, Grand Popo), built on a typology based on three criteria easily observable and quantifiable on farms: irrigation system, water resource, and planting date of the tomato plots. Within the population gathering 13 ha of urban gardens, we identified 10 cropping system types. 12 cropping systems were selected for monitoring. Data from those 12 cropping systems were aggregated per type. Their weighted mean based on weighting factors on area basis was used as a proxy of the population. *Perrin et al. (2014b) – Thèse Aurélie Perrin (Perrin, 2013)*

2.3.3. La modélisation du système pérenne en ACV

L'analyse de la littérature sur l'ACV des produits issus de systèmes pérennes avait montré qu'une majorité d'études ne tenait pas compte de l'ensemble du cycle biologique de l'arbre (Bessou et al. 2013). Afin de connaître l'impact de différents modes de prise en compte du cycle des arbres sur les résultats d'ACV, un travail détaillé d'inventaire sur un verger de clémentine au Maroc a été réalisé dans le cadre du stage d'Hadrien Heitz et encadré avec Henri Vannière. Ce travail a permis d'illustrer la grande variabilité des pratiques et des rendements sur l'ensemble des phases du verger mais aussi de mettre en évidence la grande sensibilité des résultats d'ACV à la façon de modéliser le système pérenne. Ces travaux ont fait l'objet d'un papier de conférence conjoint avec Cécile Bessou qui a appliqué un protocole similaire sur un cas d'étude palmier à huile en Indonésie (Bessou et al. 2014). Les modélisations testées dans les deux cas d'étude incluaient: (i) une modélisation chronologique sur tout le cycle de l'arbre, (ii) une modélisation basée sur trois années de suivi de la phase de pleine production et (iii) une modélisation basée sur une seule année prise au hasard sur la phase de pleine production. La figure 5 présente l'analyse de contribution des différents intrants et phases du verger. La figure 6 présente l'analyse de sensibilité des résultats d'ACV à la modélisation du cycle de l'arbre.

Les conclusions des deux études sont parfaitement cohérentes :

- Les années non-productives ont une contribution importante aux impacts environnementaux des fonctions des systèmes pérennes
- Choisir une année unique de la phase de pleine production conduit à des résultats totalement aléatoires et doit être évité absolument
- Même une modélisation basée sur trois années de suivi est insuffisante pour capturer proprement la variabilité temporelle du système pérenne et peut conduire à des erreurs
- Il est recommandé d'inclure au maximum l'ensemble des phases de l'arbre en utilisant des données réelles si possible ou au moins des données d'expert

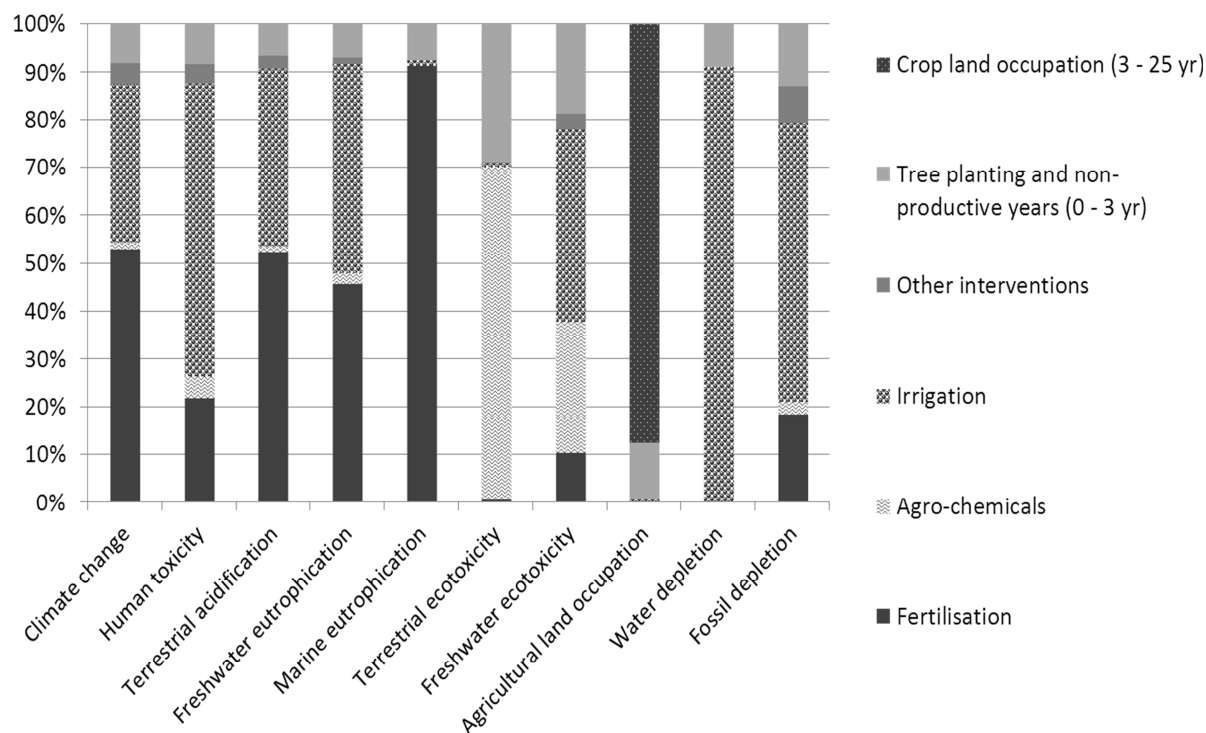


Figure 5. Contribution analysis from cradle-to-farm-gate for environmental impacts (ReCiPe-Midpoint (H)) of small citrus from Morocco. Results are expressed per kg of raw fruit. *Bessou et al. (2014) – LCAFood conference San Francisco – 2014.*

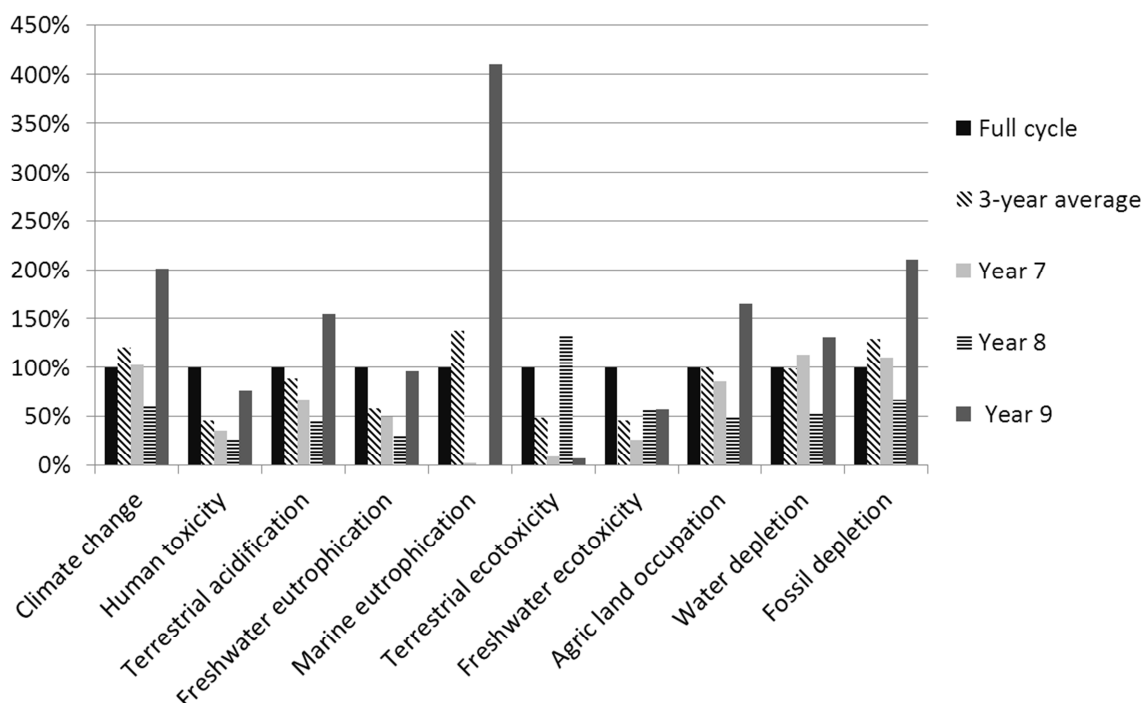


Figure 6. Environmental impacts (ReCiPe-Midpoint (H)) for different modeling approaches of the perennial crop cycle for small citrus from Morocco: full cycle modeling, 3-years average, years 7, 8 and 9. Results are expressed per kg of raw fruit. *Bessou et al. (2014) – LCAFood conference - San Francisco – 2014.*

2.4. Etablir un inventaire des flux au champ ou à l'atelier de production animal

Les questions scientifiques de fond qui ont guidé ma recherche sur le thème de l'inventaire des flux au champ ou à l'atelier animal ont été les suivantes :

- Comment discriminer l'effet des pratiques malgré la variabilité des conditions environnementales : sol, climat ?
- Quelles sont les effets des conditions de sol et de climat sur les résultats ?
- Comment intégrer l'incertitude dans la comparaison des flux ? cette question sera plus largement développée en section 2.7.

En effet, on cherche généralement à différencier avec l'ACV l'impact de systèmes contrastés ou à explorer le potentiel environnemental de systèmes alternatifs ou de nouvelles technologies par rapport à un système conventionnel existant. Plus récemment, on a aussi cherché à appliquer l'ACV à des systèmes très peu étudiés par la recherche, et peu connus des services techniques, comme la tomate en jardin urbain au Bénin (thèse d'Aurélie Perrin). En fonction de l'objectif de l'ACV, des systèmes à comparer et surtout du niveau de connaissances sur les flux au champ, il va être nécessaire de développer des stratégies d'estimation des flux très différentes et souvent basées sur une combinaison de plusieurs méthodes.

On peut ainsi définir un gradient de méthodes possibles :

- ✓ Le recours à l'expertise pour estimer des données d'inventaire, des rendements etc...
- ✓ L'utilisation de facteurs d'émission par défaut proposés dans des rapports de synthèse (voir plus bas). Ces facteurs sont souvent calculés sur la base de méta-analyses de publications qui présentent des mesures expérimentales dans une large gamme de situations pédo-climatiques
- ✓ L'utilisation de relations simples conceptuelles (exemple bilan d'azote x bilan hydrique pour estimer le nitrate lessivé)
- ✓ Les approches de type analyse de risque où l'on évalue d'abord qualitativement un niveau de risque pour une situation donnée (fort/modéré/faible) auquel on associe une valeur d'émission quantifiée soit par simulation soit en utilisant des données mesurées disponibles dans la bibliographie
- ✓ Le recours à la modélisation de type empirique (donc au domaine de validité limité)
- ✓ Le recours à la modélisation de type mécaniste (à la validité plus large)

2.4.1. Inventaire des flux des systèmes courants bien étudiés

Les systèmes bénéficiant de nombreuses mesures de flux dans des contextes variés seront les plus faciles à étudier en ACV d'autant que l'on peut trouver en ligne des synthèses de type méta-analyse réalisées par des instances comme le GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change), ECETOC (European Center for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals), EMEP (European Monitoring and Evaluation Program), EEA (European Environment Agency). Au-delà de ces rapports par émission ou par thème environnemental comme l'effet de serre, les praticiens d'ACV bénéficient aussi de guides de bonnes pratiques pour la réalisation des inventaires tels que les rééditions successives des rapports Ecoinvent (Nemecek et Kägi, 2007) ou d'autres rapports de synthèse de référence sur

l'application de l'ACV aux systèmes agricoles (Audsley et al. 1997) ou publications méthodologiques (Brentrup et al. 2000). Les guides Ecoinvent proposent une panoplie de méthodes pour estimer l'ensemble des flux au champ. Les guides publiés par les instances européennes et internationales ainsi que les guides Ecoinvent ont été largement employés pour concevoir la méthode d'estimation des flux dans le programme Agribalyse® (Koch et Salou, 2013, page 64). Nous avons d'ailleurs appliqué la méthode Agribalyse® sur nos cas d'étude clémentine du Maroc et mangue du Brésil.

Cependant, les méthodes recommandées par Ecoinvent sont pour une bonne part des modèles empiriques paramétrés dans des conditions Suisses sous culture annuelle ou sous prairie. Ces méthodes ne devraient donc pas être employées pour tout type de culture et sous tout climat. Ils sont malgré tout assez souvent appliqués faute de mieux pour des cultures spéciales comme les cultures maraîchères en contexte méditerranéen notamment, comme Perrin et al. (2014a) l'ont montré dans leur revue bibliographique. Dans cette revue, des recommandations sont également proposées en termes de facteurs clés à prendre en compte pour estimer les différents flux en culture maraîchère et en termes de meilleures méthodes disponibles (Tableau 2).

Concernant l'inventaire des flux au champ pour les cas d'étude clémentine et mangue d'Agribalyse®, il s'agissait de l'application simple d'une méthodologie mise au point de manière consensuelle et non de recherche. L'enjeu du projet pour nos produits résidait surtout dans la mise au point de scénarios de production représentatifs comme nous l'avons évoqué au chapitre 2.3.

Table 2. Summary of recommendations related to key parameters to be included in LCI and methods to be used for the estimation of reactive nitrogen (N_r) emissions to account for specificities of vegetable cropping systems. *Perrin et al. (2014a) – Thèse Aurélie Perrin (Perrin, 2013)*

Specificities of cropping systems	Key parameters	Methods for the estimation of N _r emissions			
		NH ₃ mineral fertilizers	NH ₄ organic fertilizers	N ₂ O and NO _x	NO ₃
Vegetable cropping systems	<ul style="list-style-type: none"> · Fresh matter yield and commercial yield if suitable · Nitrogen and phosphorus inputs along with fertilizer types · Water inputs and origin · Irrigation system specificities · Crop duration and position within the year · Previous and following crop · Crop residue management 	x	x	x	x
1. Greenhouse systems	<ul style="list-style-type: none"> · Greenhouse materials and associated waste management · Allocation rules for infrastructures 	∅	∅	∅	Brentrup et al. (2000) <u>adapted to</u> soil type and irrigation management
1.1. Heated greenhouse systems	<ul style="list-style-type: none"> · Energy inputs and origin · Allocation and substitution rules associated to co-generation 				
1.2. Systems with substrate	<ul style="list-style-type: none"> · Substrate type and associated waste management · Drainage water management 	∅		∅	Bres (2009)
2. Open-field systems	<ul style="list-style-type: none"> · Soil type · Rainfall · Origin and composition of organic fertilizers · Allocation rules associated to organic fertilizers 	ECETOC (1994)...	Brentrup et al. (2000) <u>parameterized for</u> ...	IPCC (2006) & Nemecek et al. (2007)	IPCC (2006) or Brentrup et al. (2000) <u>adapted to</u> ...
2.1. Temperate context		... Gp. I	... soil type and plant cover	○	... soil type and irrigation management
2.2. Mediterranean context		... Gp. III	... soil type and plant cover	○	... soil type and irrigation management
2.3. Tropical context		Bouwman and Van Der Hoek (1997) & ECETOC (1994) Gp. II		○	... soil type, irrigation management and rainfalls

✱ Level of specificity not homogenous enough to consider only one method, ∅ level of specificity which requires a specific methods but for which no method is available to date, ○ level of specificity for which a specific methods could allow reducing the uncertainty.

2.4.2. Inventaire des flux de systèmes alternatifs ou prospectifs

Quand il s'agit d'évaluer des systèmes alternatifs ou différents modes de production, des méthodes plus spécifiques doivent souvent être développées pour permettre une comparaison cohérente des systèmes entre eux.

Nous avons proposé plusieurs méthodes d'estimation des flux pour comparer des systèmes de production de porc conventionnel, Label Rouge et Biologique de façon cohérente. Construites avec l'appui d'un comité formalisé d'experts des flux pour les systèmes porcins, ces méthodes incluent : i) l'extrapolation de facteurs d'émissions à partir de données mesurées pour les émissions gazeuses en atelier et pour la phase de compostage, ii) la mise au point de méthodes de type analyse de risque calée aux conditions locales grâce à des simulations de modèles ou des données mesurées issues de la littérature (lessivage des nitrates), iii) la combinaison de facteurs d'émissions d'ammoniaque après application de lisier ou de fumier au champ pour une technique de référence avec des facteurs de réduction selon la technique employée, iv) une synthèse bibliographique complétée par des dires d'experts pour la phase de naissance plein-air (Basset-Mens et al. 2006a).

Dans un contexte d'exploration de l'effet du niveau d'intensification pour la production de lait en Nouvelle Zélande, nous avons pu bénéficier des très nombreuses connaissances, données mesurées, modèles développés par les équipes de recherche locales notamment pour renseigner l'inventaire des gaz à effet de serre du pays (IPCC-NZ).

Basset-Mens et al. (2009a) présentent une comparaison de trois niveaux d'intensification de ferme laitière par rapport à la ferme NZ moyenne. L'inventaire des flux pour ces 4 systèmes a reposé sur l'usage du modèle OVERSEER® à la fois pour les quantités excrétées par les animaux (selon la méthode du bilan entre l'azote total ingéré et l'azote exporté dans les produits) et pour les émissions de N et P vers l'eau. Les émissions de N₂O et CH₄ ont été estimées avec la méthode IPCC-NZ qui utilise des facteurs d'émission spécifiques aux différentes fractions azotées dans le contexte NZ. Ces facteurs d'émission sont basés sur de nombreuses données mesurées qui permettent à la Nouvelle Zélande d'appliquer une méthode d'estimation de type Tiers 3 selon la nomenclature IPCC.

Dans le cadre d'une recherche de différenciation de pratiques agricoles fines, il est également possible de réaliser une méta-analyse de publications scientifiques présentant des données mesurées dans différents contextes.

Dans le cadre d'une ACV de différentes techniques d'épandage de lisier, Langevin et al. (2010) ont proposé et mis en œuvre une méta-analyse de données de flux mesurés présentées dans la bibliographie. Des facteurs d'émission relatifs pour chaque technique d'épandage par rapport à une technique de référence ont été calculés. Ayant fait l'hypothèse d'une loi uniforme pour la distribution des données mesurées dans la bibliographie, les résultats d'ACV ont pu être exprimés sous la forme d'une distribution de probabilité à l'aide d'une analyse d'incertitude par simulation Monte-Carlo.

2.4.3. Inventaire des flux par modélisation

Langevin (2010) ; Langevin et al (2014) ; Perrin (2013)

Dans le cadre d'ACV comparatives complexes telles que la comparaison de l'effet des matériels d'épandage à des fins d'éco-conception (thèse de Brigitte Langevin) ou dans le cadre d'ACV sur des systèmes très peu étudiés comme la tomate en jardin urbain au Bénin (thèse d'Aurélien Perrin), la modélisation a pu être utilisée pour explorer l'effet des pratiques, du sol et du climat sur les résultats d'ACV. Je présente ci-dessous les expériences dégagées et les perspectives.

Dans le cadre de sa thèse, Brigitte Langevin a mis au point un modèle nouveau appelé OSEEP (Outil de Simulation des Epandeurs sur les Pertes azotées) résultat de la liaison de plusieurs modèles existants : STICS, Volt'Air, COMPSOIL et permettant de simuler les émissions de NH_3 et de N_2O suite à l'épandage de lisier pour un panel de techniques d'épandage. Les simulations avec OSEEP ont permis d'orienter les efforts d'éco-conception des épandeurs de façon très concrète et pertinente. Elles ont également permis de mettre en évidence les situations environnementales à risque et les techniques apportant les meilleurs compromis environnementaux. Au-delà de ces résultats spécifiques aux techniques d'épandage, la démarche de mise au point d'un nouveau modèle et de validation associée a une portée générique qui a été formalisée (Langevin et al. 2014). Elle inclut les étapes suivantes :

1. Identification des effets de la pratique étudiée sur les variables environnementales au champ
2. Hiérarchisation des effets principaux pour une prise en compte dans la modélisation
3. Sélection d'un ou plusieurs modèles candidats pour simuler ces effets principaux. Si aucun modèle exhaustif n'existe, plusieurs modèles doivent être identifiés et liés. On préférera des modèles mécanistes qui sont valides dans une large gamme de contextes de sol et de climat. Un modèle principal est sélectionné, en général un modèle de culture auquel des modèles complémentaires sont liés. L'intérêt d'une liaison simple entre modèles et non d'un couplage réel est d'éviter tout risque d'amplification d'incertitudes générées par les modèles.
4. Validation : s'il n'est pas possible de réaliser des expérimentations pour valider formellement les sorties du nouveau modèle, une approche de validation par facteurs d'émission relatifs calculés à partir de données bibliographiques est proposée. Sur la base des travaux de mesures de flux publiés, l'émission de chaque polluant est exprimée de façon relative à l'émission du même polluant dans les mêmes conditions pour une technique de référence. Les distributions des facteurs d'émission relatifs calculés avec les données bibliographiques et avec le modèle sont comparées à l'aide de tests statistiques.

Cette démarche requiert de solides connaissances sur les processus biochimiques et biophysiques en jeu. Sa portée est par ailleurs limitée par les limites conceptuelles des modèles existants. Un processus mal connu et donc pris en compte de façon sommaire dans un modèle existant le sera par définition également dans le modèle intégré. Si trop de processus sont mal connus, l'exercice peut s'avérer impossible. Cependant, les améliorations des modèles dans leurs versions futures seront faciles à mettre en œuvre dans le modèle lié.

Dans un autre contexte de travail et dans un autre objectif, Aurélien Perrin a également utilisé le modèle mécaniste STICS pour explorer l'effet des pratiques des agriculteurs, du sol et du climat sur les émissions d'azote réactif en parcelle de tomate des jardins urbains au Bénin. Elle a suivi une

démarche similaire à celle de Brigitte Langevin incluant une étape d'identification des facteurs clés influençant les émissions d'azote au champ suivie de la sélection d'un modèle prenant en compte au mieux l'ensemble de ces facteurs. Encore une fois, le choix du modèle STICS a notamment reposé sur sa capacité à simuler l'ensemble de ces émissions de façon robuste dans une large gamme de conditions pédoclimatiques. En réalisant des régressions linéaires simples et multivariées entre les variables d'entrée et de sortie du modèle, Aurélie Perrin a pu identifier 4 facteurs prépondérants sur les émissions au champ d'azote réactif dans son contexte : la dose d'azote organique appliquée, le volume d'eau d'irrigation, le pH du sol et la capacité au champ. Une bonne prise en compte de ces facteurs permet donc de couvrir une grande part de la variabilité des émissions des systèmes étudiés. En termes de validation, la seule variable à la fois simulée par le modèle et mesurée était le rendement. Si le modèle parvient à simuler la réponse du rendement aux variables rayonnement, température et eau, il ne tient pas compte des stress biotiques (attaques de ravageurs, maladies...) d'où l'impossibilité de valider les simulations du modèle sur la base du rendement. Les sorties du modèle et les facteurs d'émission associés ont été comparés à la fois avec les facteurs d'émission par défaut généralement utilisés en ACV (section 2.4.1) et avec des données mesurées reportées dans la littérature pour des systèmes de production comparables. Cela a permis d'en valider la cohérence et les ordres de grandeur. De plus, associé à un bilan d'azote, la simulation par STICS a permis de remettre en question l'hypothèse de stabilité de la matière organique du sol qui est faite dans le cadre des ACV classiques en contexte tempéré. Au contraire, d'importants excès du bilan d'azote ont été mis en évidence pour les parcelles étudiées posant le problème du devenir de ces flux potentiels au-delà des limites temporelles du système étudié et de la sous-estimation probable de leurs émissions. Compte tenu de l'impossibilité de valider de façon formelle les sorties de STICS dans ce contexte, le modèle a été employé plus comme outil de connaissances et d'exploration que comme outil réellement prédictif. Il a permis de discriminer les pratiques des producteurs en fonction du contexte pédoclimatique, d'identifier les situations les plus à risque, d'identifier les facteurs clés d'influence, les principales sources d'incertitude et la non-applicabilité de l'hypothèse d'une matière organique du sol stable.

L'usage de STICS dans un tel contexte de pénurie en données ne peut représenter qu'une étape. Devant la difficulté à paramétrer le modèle de façon fiable et l'impossibilité de le valider de façon ultime faute de données, Aurélie Perrin insiste dans la discussion de sa thèse sur l'importance d'acquérir des données mesurées réelles sur ces systèmes. Elle rappelle également les limites d'ordre conceptuel des modèles disponibles telles que l'absence de prise en compte des stress biotiques par STICS. Il est également important de mettre au point des outils opérationnels pour les praticiens d'ACV notamment. Une piste envisagée est celle de la mise au point d'outils simplifiés à partir de modèles complexes validés, soit au travers d'une interface avec les utilisateurs qui présente seulement les paramètres clés à tester, soit au travers d'une véritable simplification du modèle en produisant un méta-modèle. Le principe du méta-modèle est de parvenir à « réduire le modèle à une fonction de réponse déterminée par un nombre limité de paramètres ».

Dans les deux thèses, les outils mobilisés sont très lourds à prendre en main et à paramétrer. Ceux-ci ne peuvent en général être utilisés que dans le cadre de travaux de recherche mais ces derniers doivent pouvoir conduire à des outils simplifiés au service des praticiens d'ACV. Pour finir, l'utilisation des modèles en ACV nécessite un usage en phase avec le cadre conceptuel de l'ACV où les questions des limites du système étudié par rapport à son environnement, d'intégration temporelle des

émissions et d'allocation des émissions et impacts à la fonction étudiée doivent être proprement traitées.

2.4.4. Conclusions

On a montré dans cette partie sur les inventaires qu'une palette très variée d'approches a dû être mise au point et employée pour atteindre les objectifs spécifiques de chaque ACV sur laquelle nous avons travaillé. Il est le plus souvent nécessaire de combiner des approches de natures très différentes pour parvenir à estimer l'ensemble des flux requis pour un inventaire de cycle de vie et pour l'ensemble des options techniques étudiées. Toutes ces méthodes génèrent de l'incertitude que ce soit conceptuellement ou de par les données qu'elles utilisent. Ces incertitudes doivent être prises en compte dans le cadre d'analyses de sensibilité et d'incertitude dédiées (voir section 2.7).

2.5. Modélisation des impacts environnementaux prépondérants pour les systèmes agricoles

Comme évoqué dans les questions scientifiques propres à l'application de l'ACV aux productions agricoles en sections 2.1 et 2.2, plusieurs impacts environnementaux prépondérants pour ces systèmes ne sont pas correctement pris en compte en ACV. Cela concerne les impacts régionaux sensibles aux conditions locales comme l'eutrophisation aquatique, identifié comme problème environnemental majeur en Bretagne où j'ai fait ma thèse. Il s'agit aussi des impacts en lien avec l'utilisation d'une ressource naturelle telle que l'eau pour l'irrigation ou la terre agricole. La disponibilité de ces ressources pour différents usages dépend aussi de leur qualité. En effet, une eau de bonne qualité peut servir à tous les usages alors qu'une eau polluée ne pourra pas servir comme eau de boisson par exemple. Dans le cadre de la thèse de Sandra Payen, la prise en compte des impacts liés à l'utilisation d'eau douce est apparue cruciale pour l'application de l'ACV aux productions horticoles en général et en contexte semi-aride en particulier. Dans ce cadre, une nouvelle lacune de l'ACV a également été identifiée comme critique : la non-prise en compte des phénomènes de salinisation.

2.5.1. Analyse du modèle conceptuel des impacts en ACV et proposition pour une meilleure prise en compte de l'eutrophisation aquatique

Basset-Mens (2005), chapitre 5.

Le cycle de vie d'un produit ou d'un service rendu est un système distribué dans le temps et dans l'espace. Afin de quantifier l'ensemble des impacts associés à ce système complexe, la modélisation des impacts en ACV a d'abord été proposée pour un environnement générique moyen (Heijungs et al. 1992). Basé sur des indicateurs d'impact intermédiaires dans la chaîne de cause à effet (indicateurs midpoint), ces modèles d'impact ou modèles dits de caractérisation en ACV, intègrent les impacts sur l'infini et sur la planète entière mais sans prendre en compte les caractéristiques spécifiques de tous les sites de production sur le cycle de vie du produit. Depuis de nombreuses années, cette première génération de modèles de caractérisation est remise en question surtout pour les ACV pour lesquelles les impacts régionaux sont prépondérants comme les systèmes agricoles. Les impacts décrits autrefois comme potentiels acquièrent au fil des travaux scientifiques une plus grande pertinence scientifique avec la modélisation d'une part plus grande de la chaîne de cause à effet entre émission et impact et la définition d'indicateurs plus proches des dommages

environnementaux (indicateurs endpoint). Les impacts sont également de plus en plus spatialisés d'abord surtout pour l'Europe et plus récemment pour d'autres continents. La schématisation du calcul de ces impacts en ACV est présentée en figure 7.

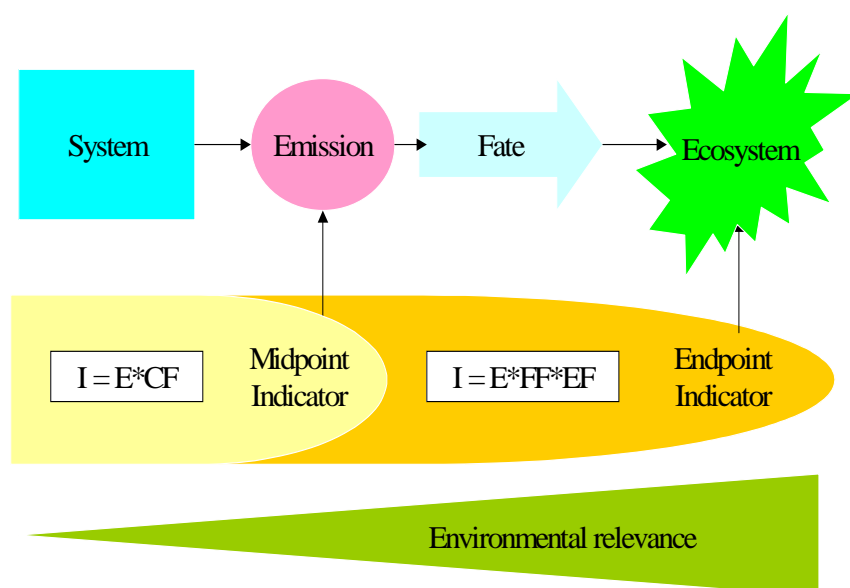


Figure 7. Comparison of midpoint and endpoint indicators defined at different stages of the cause and effect chain for a target ecosystem. In the midpoint approach, the impact is calculated by multiplying the emission (E) by the generic characterisation factor (CF), while the endpoint calculation includes a fate factor (FF) for each pollutant in each compartment, and an effect factor (EF), representative of the sensitivity of the ecosystem.

L'évolution du modèle conceptuel pour caractériser les impacts en ACV sur les écosystèmes (écotoxicité, acidification terrestre, eutrophisation aquatique) a été analysée et présentée dans un chapitre de ma thèse (Basset-Mens, 2005). Une analyse des carences méthodologiques de la modélisation de l'eutrophisation aquatique a été proposée ainsi qu'une illustration de l'écart entre la valeur de l'indicateur midpoint de cet impact sous forme de biomasse aquatique produite, par rapport aux quantités réelles de biomasse effectivement produites sur un cas d'étude en Bretagne (figure 8).

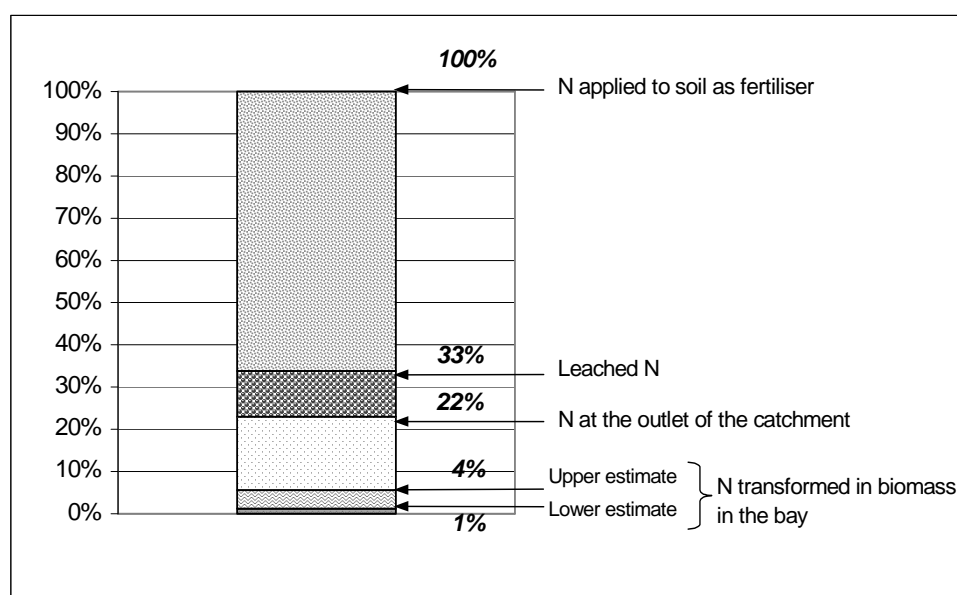


Figure 8. Fate of nitrogen applied to the soil as fertiliser at various stages of the cause and effect chain in a catchment area connected with the most sensitive bay in Brittany (Saint Michel en Grèves).

L'article se terminait par une série de propositions concrètes pour une meilleure prise en compte de la réalité du phénomène. Ces propositions, valides surtout dans le cadre d'ACV de systèmes agricoles en région de production agricole intensive incluaient principalement :

- La définition d'un indicateur de biomasse confinée plutôt que de biomasse potentielle
- La mise au point de facteurs de devenir spatialisés des nutriments
- La définition de facteurs d'effet pour les principaux types d'écosystèmes récepteurs

2.5.2. Mise au point de facteurs de devenir du nitrate dans une région de production agricole intensive

Basset-Mens et al. (2006b)

Suite à ce travail d'analyse conceptuelle des modèles d'impact en ACV et aux propositions concrètes pour la catégorie d'impact eutrophisation aquatique, j'ai proposé une approche pour produire des facteurs de devenir du nitrate dans les bassins versants tenant compte du type de bassin versant et du climat. Ces facteurs de devenir sont les facteurs multiplicatifs utilisés en ACV sur les flux d'émission pour tenir compte de la part perdue dans chaque compartiment de l'environnement avant d'atteindre les cibles environnementales (figure 7). Par exemple, une partie du nitrate émis au champ par lessivage va être transformé par dénitrification dans les zones humides du bassin versant. Le facteur de devenir du nitrate dans le compartiment eau est donc généralement inférieur à 1.

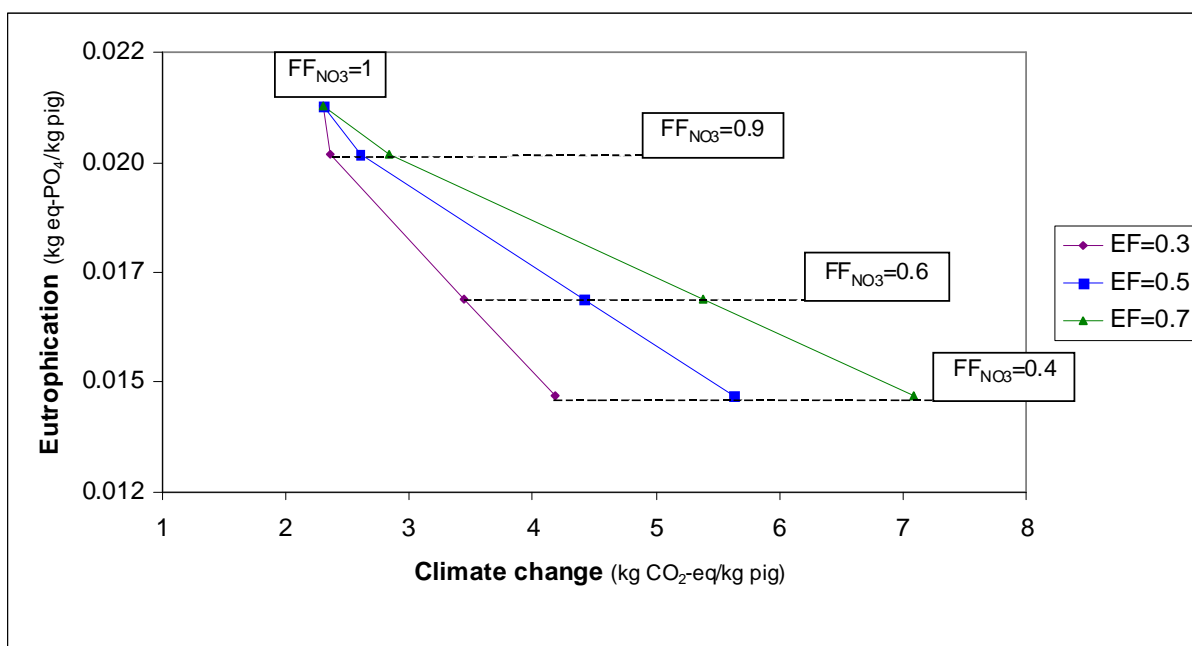


Figure 9. Influence of the nitrate fate factor (FF_{NO_3}) and different hypotheses of the fraction of nitrate lost as N_2O (EF) on LCA results (for 1 kg of pig) for eutrophication and climate change impact categories. *Basset-Mens et al (2006b)*

Pour une région de production agricole intensive où les données, connaissances et modèles sont nombreux, une approche basée sur la typologie des bassins versants, la conception de scénarios contrastés de bassins versants et de climat et l'usage d'un modèle hydrologique, a été proposée pour produire des facteurs de devenir du nitrate à l'état stable des bassins versants. Dans le cas d'application de la Bretagne, une large gamme de facteurs de devenir du nitrate a été obtenue.

Appliquée aux résultats d'une étude ACV sur le porc en Bretagne, cette recherche a révélé la sensibilité de l'impact eutrophisation et surtout de l'impact changement climatique au facteur de devenir du nitrate et au facteur de conversion du nitrate en oxyde nitreux dans les zones humides (figure 9).

2.5.3. Importance d'une prise en compte fiable des impacts liés à l'usage d'eau douce : illustration sur la comparaison d'une tomate d'export et d'une tomate française.

Payen et al. (2014a)

L'importance de prendre en compte les impacts liés à l'usage d'eau douce a été réalisée récemment par la communauté ACV. Dans son article sur la comparaison par l'ACV de la tomate de contre-saison pour le marché français en provenance du Maroc ou de France (Boulard et al. 2011), Sandra Payen a montré un classement des systèmes inversé entre les catégories d'impact « classiques » telles que changement climatique, eutrophisation, consommation d'énergie non renouvelable d'une part et la privation en eau (« water deprivation ») d'autre part. En effet, si la tomate d'import en provenance du Maroc présente de sérieux avantages par rapport à son alternative française en termes de changement climatique, consommation d'énergie et eutrophisation, elle présente un impact sur la ressource en eau locale beaucoup plus grand (Tableau 3).

Table 3. Global Warming Potential (kg CO₂ eq), Energy use (MJeq), Marine eutrophication potential (g Neq), Freshwater eutrophication potential (g Peq), Acidification potential (g SO₂ eq) and Freshwater deprivation potential (L H₂Oeq) of 1 kg of tomato for the Moroccan and French off-season tomato production systems. *Payen et al. (2014a)*.

	Cropping system and functional unit	Climate change (100 year)	Non-renewable energy consump°	Marine eutrophic°	Freshwater eutrophic°	Terrest. acidific°	Water deprivat° Pfister et al. 2009 ¹
		kg CO ₂ eq	MJ-eq	g N-eq	g P-eq	g SO ₂ -eq	L H ₂ O-eq
This study	1 kg tomato at St Charles market gate, grown in plastic greenhouse in Morocco	0.55	9.13	0.21	0.17	3.20	29.7
	1 kg tomato at farm gate, grown in plastic greenhouse in Morocco	0.22	3.61	0.05	0.11	1.28	28.0
Boulard et al. (2011) adapted	1 kg tomato at the farm gate, grown in glass/plastic greenhouse in France	1.75	30.44	0.96	0.18	2.94	7.5

¹Water deprivation for the water consumed during foreground and background processes.

Dans cet article, Sandra Payen identifie également les carences méthodologiques de la modélisation des impacts liés à l'eau douce. Elle relève notamment le caractère incertain des impacts modélisés jusqu'au stade endpoint qui sont très dépendants des hypothèses faites. En effet, pour intégrer les impacts midpoint en impact endpoint « consommation de ressources », on peut soit utiliser des facteurs d'équivalence énergétique soit des facteurs d'équivalence monétaire basés sur le coût de la technologie permettant de régénérer la ressource. Les facteurs d'équivalence (ou facteurs de dommage) entre l'eau et le fioul lourd sont plus proches en valeur énergétique qu'en valeur monétaire ce qui conduit à des résultats différents selon qu'on emploie l'une ou l'autre méthode. Sandra Payen explique aussi que si de nombreux travaux sont réalisés à l'heure actuelle sur la modélisation des impacts liés à l'usage d'eau douce, aucune recherche sur la phase d'inventaire des flux d'eau et de polluants n'est réalisée alors qu'il s'agit d'une étape de l'ACV tout aussi complexe et sans laquelle la modélisation des impacts ne peut avoir lieu. Enfin, elle identifie la question de la salinisation, aujourd'hui négligée, comme très importante à intégrer en ACV.

2.5.4. Analyse des chaines de cause à effet des impacts de salinisation et propositions de travail

Payen et al. (2014b)

Suite à cette analyse plus générale des défis scientifiques sur la modélisation des impacts liés à l'usage d'eau douce en ACV, Sandra Payen s'est concentrée sur la question de la salinisation en ACV. Dans le cadre d'un groupe de travail sur la salinisation regroupant différents experts du sujet (Olivier Grünberger, Montse Nunez-Pineda, Serge Marlet, Stéphane Follain, Sylvain Perret, Claudine Basset-Mens) et animé par ses soins, elle a travaillé à formaliser l'ensemble des chaines de cause à effet des impacts salinisation qui affecte à la fois les sols, l'eau et ultimement les êtres humains, les écosystèmes et les ressources (figure 10).

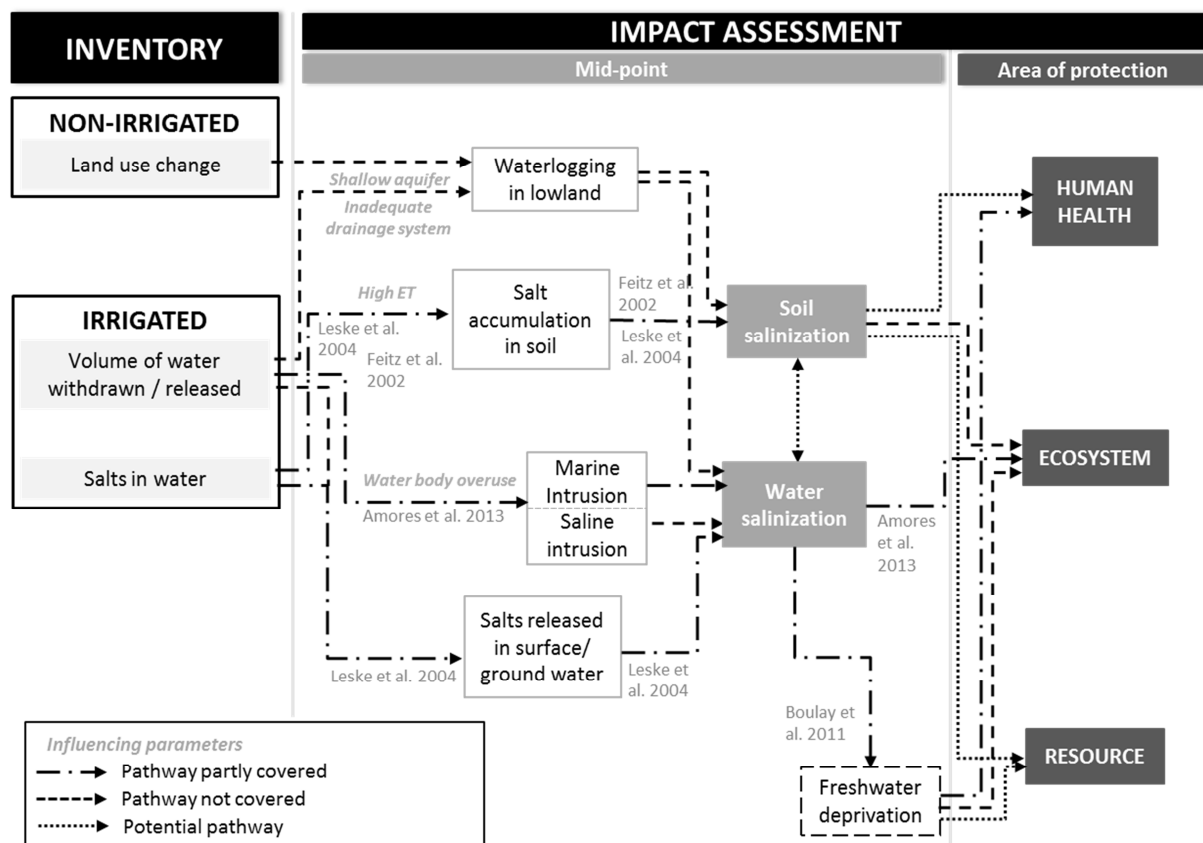


Figure 10. Human-driven salinization cause and effect chains and positioning of approaches proposed in the literature. *Payen et al. (2014b). LCA Food conference San Francisco, 2014.*

Cette analyse a fait l'objet d'un article de conférence (Payen et al. 2014) avec une perspective de publication dans un numéro spécial de la revue Journal of Cleaner production. Dans le même article, un état de l'art des quelques publications présentant une prise en compte de la salinisation en ACV a révélé des approches encore partielles à la fois en termes de chaînes de cause à effet couvertes et de validité géographique. Pour finir, Sandra Payen propose des perspectives pour une intégration cohérente des impacts salinisation en ACV. Plusieurs questions méthodologiques délicates sont posées pour permettre une telle intégration : où doit-on définir la frontière entre le système étudié et l'environnement dans le cadre des mécanismes de salinisation ? Quel est le statut de l'aire de protection « consommation de ressources » ? Comment éviter d'éventuels risques de double-comptage d'impact compte tenu des différents modes de prise en compte des impacts liés aux ressources en ACV ? Ces questions sont aujourd'hui toujours en débat dans la communauté ACV. Une contribution méthodologique permettant de faire progresser la communauté scientifique sur ces points serait donc très utile. Elle représente l'objectif suivant de la thèse de Sandra Payen.

2.6. Connaissances acquises sur l'éco-efficience des fonctions des systèmes de production animaux et végétaux

L'ensemble du travail méthodologique présenté jusqu'ici avait pour objectif de permettre une évaluation fiable de systèmes contrastés remplissant la même fonction. Mis en œuvre dans différentes études ACV assorties d'analyse de sensibilité et d'incertitude, ces travaux nous ont permis de produire des connaissances sur l'éco-efficience des systèmes à remplir une fonction donnée (impacts par unité fonctionnelle). Une synthèse de l'ensemble de ces connaissances pour nos principales études ACV publiées est présentée dans le tableau 4 pour les produits animaux et dans le tableau 5 pour les produits horticoles. Nous avons notamment travaillé sur l'effet du mode de production (bio versus conventionnel), de la qualité des pratiques (pratiques raisonnées ou pratiques excessives), de l'intensification (lait NZ), de la variabilité des systèmes et des conditions de sol et de climat, de l'origine géographique des produits (tomate du Maroc ou de France) et enfin du choix de fruits à consommer.

Chaque système présente des points critiques et des marges de progrès. On constate que selon la méthode d'estimation des flux mise en œuvre (facteurs d'émission issus de la littérature ou modélisation mécaniste), les conclusions, sans se contredire, peuvent être plus ou moins fines comme les travaux de thèse de Brigitte Langevin et Aurélie Perrin l'ont montré.

L'usage de plusieurs unités fonctionnelles dont nous avons peu parlé jusqu'à présent est important pour l'évaluation des systèmes agricoles qui sont par essence multifonctionnels. Cela permet d'évaluer de façon plus juste des systèmes qui, tout en ayant une fonction commune, n'ont pas forcément complètement les mêmes objectifs. Par exemple, il n'est pas légitime de n'évaluer un système biologique que par unité produite car l'objectif recherché par ce cahier des charges n'est pas d'atteindre simplement un rendement élevé mais de produire un aliment sain en préservant un équilibre avec l'environnement et les communautés locales.

Dans cette approche multicritère, il est rare d'avoir des systèmes moins impactants pour toutes les catégories d'impact. Une délibération entre acteurs concernés doit généralement ensuite intervenir pour aller vers une prise de décision qui n'est plus du ressort strict de l'étude ACV. La question de l'incertitude est un aspect important dans la prise de décision. C'est un thème central de la mise en œuvre de l'ACV aux systèmes agricoles que j'ai largement exploré dans mes recherches. J'en propose une synthèse dédiée à la section suivante.

Tableau 4. Principales études ACV publiées sur produits animaux et leurs principales connaissances acquises

Publications	Objectifs ACV	Méthode d'inventaire stade agricole (données techniques et flux au champ)	Connaissances acquises
Basset-Mens et al. (2005)	Comparer le porc conventionnel (GAP), Label Rouge (RL) et biologique (OA) par kg de porc et par ha	Scénarios de production basés sur statistiques, bases de données et expertises Inventaire des flux selon Basset-Mens et al. (2006)	RL est une alternative intéressante à GAP si ses émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites OA a moins d'eutrophisation et d'acidification que GAP par ha mais plus par kg de porc Chaque système a des marges de progrès importantes
Basset-Mens et al. (2006c)	Hiérarchiser les sources de variations des impacts entre le cahier des charges, la qualité des pratiques, l'incertitude des paramètres clés	Analyse de sensibilité aux variations des paramètres de performance et des flux au champ et en bâtiment par scénarios favorables et défavorables	L'intervalle d'incertitude des résultats liée aux paramètres de performance et d'émissions est plus grand que la variation liée au mode de production Les impacts peuvent être plus sensibles à la qualité des pratiques qu'au mode de production Le classement de systèmes avec des niveaux d'intensification très contrastés dépend beaucoup de l'unité fonctionnelle choisie : kg ou ha
Basset-Mens et al. (2009a)	Evaluer le lait NZ moyen et différents niveaux d'intensification des fermes laitières	Système moyen décrit par statistiques et bases de données Scénarios d'intensification basés sur expérimentation Flux : OVERSEER® et IPCC-NZ	Le lait NZ est plus éco-efficient (moindres impacts par kg) que le lait européen L'intensification du système NZ dégrade son éco-efficience quelle que soit l'unité fonctionnelle choisie Le système traditionnel le moins intensif est le moins impactant par kg et par ha car reposant sur des ressources renouvelables Tous les systèmes possèdent des marges de progrès
Langevin et al. (2010)	Comparer différentes techniques d'épandage de lisier à des fins d'éco-conception	Facteurs d'émission relatifs par rapport à une technique de référence calculés avec données mesurées publiées	Les épandages par injection et par enfouissement différé réduisent l'acidification et l'eutrophisation par rapport à l'épandage par buse-palette ou en bandes avec pendillards mais augmentent l'effet de serre surtout l'injection. Le meilleur compromis est l'enfouissement différé (« harrowing »).
Langevin et al. (2014)	Comparer différentes techniques d'épandage de lisier à des fins d'éco-conception	Simulation NH ₃ et N ₂ O avec modèle OSEEP qui simule la distribution spatiale du lisier épandu, son incorporation et la compaction du sol par le passage des engins	Une meilleure homogénéité d'épandage que celle obtenue en routine actuellement ne conduirait à aucun bénéfice significatif en termes d'émission Le poids des matériels joue un rôle important sur les émissions de N ₂ O L'injection du lisier réduit les émissions de NH ₃ mais a un effet soit bénéfique soit néfaste sur les émissions de N ₂ O selon le niveau de saturation en eau du sol La profondeur d'injection compte surtout pour les émissions de NH ₃

Tableau 5. Principales études ACV publiées sur produits horticoles et leurs principales connaissances acquises

Publications	Objectifs ACV	Méthode d'inventaire stade agricole (données techniques et flux au champ)	Connaissances acquises
Perrin (2013)	Evaluer la tomate en jardin urbain au Bénin en tenant compte de la diversité de pratiques	Typologie selon 4 modalités + échantillonnage de 12 parcelles Agrégation par type et par modalité + calcul de la moyenne pondérée à partir des types selon la surface Flux estimés avec meilleurs facteurs d'émission par défaut disponibles	Les impacts par kg sont très variables entre les systèmes notamment en lien avec les grandes variations de rendement Globalement, les impacts par kg de la tomate en jardin urbain au Bénin sont très élevés par rapport aux impacts publiés pour d'autres systèmes horticoles (Perrin et al. 2013). Cela est dû essentiellement en tomate de jardins urbains au Bénin : à des apports élevés de fertilisants organiques, l'usage important d'insecticides toxiques, l'usage de pompes au diesel peu efficaces et des rendements faibles
Perrin (2013)	Evaluer la tomate en jardin urbain au Bénin en intégrant la sensibilité aux paramètres clés des émissions d'azote	Scénario de référence = moyenne pondérée Simulations des émissions d'azote avec STICS pour scénario de référence et pour scénarios favorables et défavorables	L'eau d'irrigation consommée et la dose d'azote apportée ont un effet majeur sur les émissions d'azote et sur les impacts eutrophisation, changement climatique, acidification donc il est important de les inclure dans la méthode d'estimation De même les paramètres du sol jouent un rôle important sur les émissions d'azote et sur les impacts mais révèlent des mécanismes de compensation entre les flux azotés L'hypothèse de stabilité de la matière organique du sol utilisée dans la méthode par facteurs d'émission par défaut est invalidée par le modèle. De plus, les facteurs d'émission dans cette méthode sont trop élevés pour N ₂ O, NH ₃ et trop faibles pour NO ₃ (en lien avec les volumes d'eau apportés) Globalement, les simulations avec STICS permettent une estimation des flux d'azote au champ plus spécifique des pratiques et des conditions de sol et de climat et l'identification des situations les plus à risque. Elles permettent également l'identification des paramètres clés et de leur incertitude.
Payen et al. (2014)	Evaluer la tomate de contre-saison produite au Maroc pour le marché français et la comparer avec la tomate de France	Système moyen à partir d'un échantillon de 3 fermes sur trois ans Flux estimés avec meilleurs facteurs d'émission par défaut disponibles	Le classement entre les systèmes marocain et français change selon les catégories d'impact. Le système marocain présente des impacts changement climatique, eutrophisation et consommation d'énergie beaucoup plus faibles que le système français mais un impact privation d'eau douce beaucoup plus fort. Les dommages totaux sont très incertains et probablement sous-estimés en ce qui concerne la catégorie privation d'eau douce
Basset-Mens et al. (2014)	Evaluer 4 fruits consommés sur le marché français : 2 importés (clémentine et mangue) et 2 locaux (pomme et pêche)	Scénarios représentatifs basés sur expertise et données statistiques pour pomme, pêche et clémentine et sur une enquête dans 8 vergers pour mangue Méthode Agribalyse (Koch et Salou, 2013) pour estimation des flux au champ	Pour la majorité des catégories d'impact la pomme présente le moins d'impact par unité produite, la clémentine le plus et les deux autres fruits des impacts intermédiaires Ceci est expliqué par les niveaux de rendements et d'intrants des différents fruits mais aussi par la part d'énergie fossile dans le mix électrique des différents pays producteurs Si la mangue présente l'impact toxicité le plus faible de tous, ce résultat présente une grande incertitude liée à la difficulté à capter la variabilité des pratiques phytosanitaires

2.7. Robustesse et incertitude des résultats d'ACV

En ACV les sources d'incertitude sont nombreuses et se retrouvent cumulées dans les résultats d'impact finaux. Présenter des résultats d'ACV sous la forme de points uniques est donc une très grande surestimation de la confiance que l'on a en leur valeur. L'incertitude peut être liée aux données utilisées, aux limitations conceptuelles des modèles employés ou encore aux jugements de valeur intégrés dans le processus d'évaluation (choix de l'unité fonctionnelle, méthodes de pondération des impacts par exemple). Plusieurs synthèses bibliographiques détaillées sur le thème de l'incertitude en ACV ont été proposées notamment dans les introductions des thèses (Basset-Mens, 2005 ; Langevin, 2010 ; Perrin, 2013).

Evaluer l'adéquation des méthodes et données employées par rapport aux objectifs de l'ACV, tester la robustesse des résultats sont des étapes indispensables pour permettre aux utilisateurs des études de prendre des décisions qui tiennent compte de ces résultats. Ces étapes sont prévues dans la 4^{ème} étape de la méthodologie ACV appelée phase d'interprétation mais elles peuvent prendre des niveaux de complexité divers depuis la simple évaluation de la qualité des données par DQI (Data Quality Index) recommandé par le guide ILCD jusqu'à des simulations Monte-Carlo en passant par l'évaluation de la fourchette des résultats grâce à des scénarios favorables et défavorables. Nous avons eu recours à l'ensemble de ces approches dans le cadre de nos différents projets d'ACV et avons pu faire certaines recommandations pour les praticiens d'ACV.

La méthode des DQI a été appliquée sur deux jeux de données récemment publiés l'un sur la tomate en jardin urbain au Bénin (Perrin et al. 2014b) et l'autre sur la tomate de contre-saison produite au Maroc (Payen et al. 2014a).

L'approche par scénarios favorables et défavorables associée à un scénario de référence où toutes les valeurs de paramètres sont mises sur la valeur moyenne, a été appliquée une première fois sur l'étude ACV du porc breton (Basset-Mens et van der Werf, 2005) en explorant les amplitudes de variation pour les paramètres de performance des systèmes et celles des émissions au champ et en bâtiment. Elle a également été appliquée par Aurélie Perrin dans le cadre de sa modélisation des émissions d'azote avec le modèle STICS en incluant 4 paramètres clés pour les émissions d'azote réactif au champ (Perrin, 2013). Cette approche permet de calculer l'amplitude de résultats possibles par rapport aux paramètres pris en compte dans la construction des scénarios. Elle conduit généralement à des fourchettes assez larges dont les extrêmes correspondant à la combinaison des valeurs favorables d'un côté et défavorables de l'autre ont plutôt une probabilité faible. Dis autrement, on peut être relativement sûr d'avoir la valeur moyenne des impacts contenue dans cet intervalle.

La modélisation stochastique où les paramètres ne sont plus décrits par une valeur unique discrète mais par une distribution de probabilité a été appliquée à plusieurs reprises. Sur le cas d'étude du changement climatique pour 1 kg de lait NZ, nous avons testé dans une visée méthodologique et pédagogique, plusieurs modes de mise en œuvre des simulations stochastiques en utilisant soit la variabilité des paramètres clés (au travers de l'écart-type) soit l'incertitude attachée à la prédiction de leur moyenne (au travers de l'erreur standard de la moyenne) (Basset-Mens et al. 2009b). Les distributions de résultats obtenues et leurs caractéristiques statistiques sont sensiblement différentes (Figure 11). Dans le cadre de ce travail nous avons également testé la sensibilité des

résultats au choix de l'horizon de temps pour calculer les facteurs de changement climatique. Les fourchettes de variation obtenues allaient de $\pm 7\%$ avec l'incertitude de la moyenne, $\pm 38\%$ avec la variabilité (ou incertitude totale comme défini dans la figure) à $-54\%/+92\%$ pour les horizons de temps pour calculer les facteurs de changement climatique. Pour mieux appuyer le processus de décision, nous recommandons l'usage de l'incertitude attachée aux moyennes des paramètres pour la réalisation des simulations Monte-Carlo en études ACV.

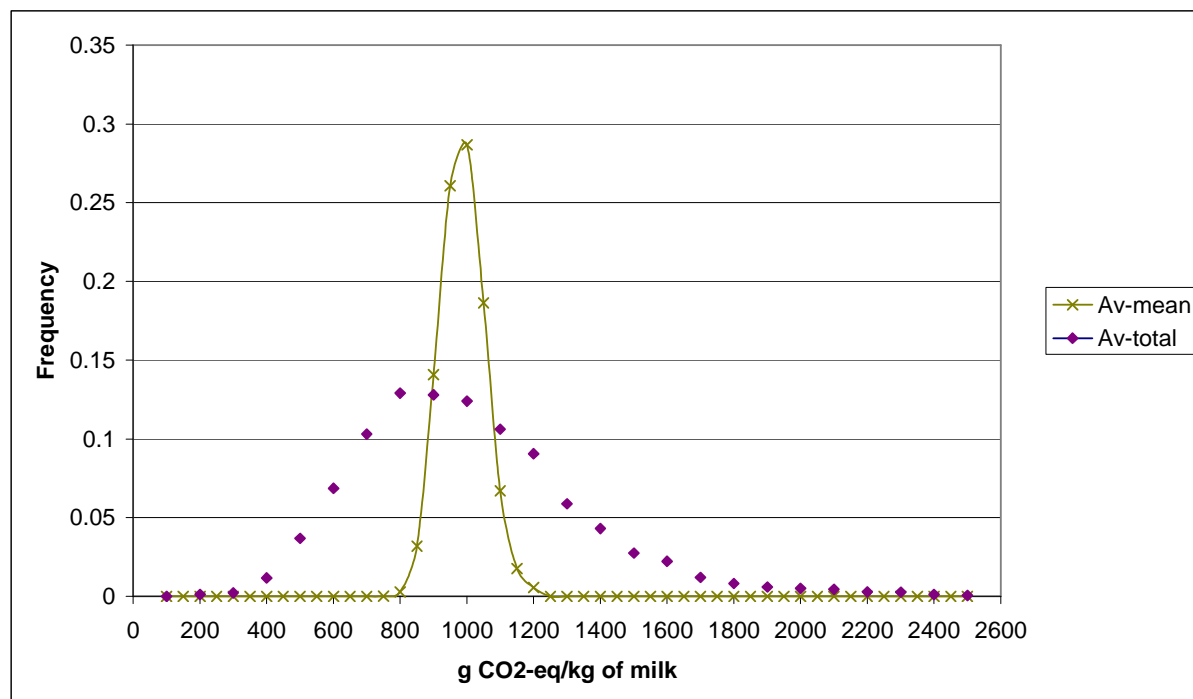


Figure 11. Frequency distributions of GWP of one kg of milk for the average NZ farm according to “mean” and “total” uncertainty analyses

La modélisation stochastique a également été employée par Brigitte Langevin pour comparer de manière robuste avec l'ACV différentes techniques d'épandage en propageant jusqu'aux résultats d'ACV des intervalles de valeurs d'émissions tirés de la bibliographie et supposés équiprobables (Langevin et al. 2010).

Bien sûr, dans le cadre d'études ACV basées sur la collecte de données sur des échantillons comme dans le cas de la thèse d'Aurélien Perrin, il est toujours possible de présenter la moyenne et les écarts-types des résultats d'impact (Perrin, 2013).

Au-delà des analyses d'incertitude à proprement parler qui quantifient l'ensemble des incertitudes cumulées sur les résultats finaux, la robustesse des résultats d'ACV doit au moins être explorée grâce à des analyses de sensibilité aux variations des paramètres clés. Toutes nos études ACV ont fait l'objet de telles analyses. Toutes ces démarches y compris les analyses d'incertitude, passent, pour être faisables et efficaces, par des analyses de contribution des processus et d'identification des paramètres clés. Avant de pouvoir diffuser un résultat d'ACV, plusieurs analyses successives sont donc indispensables afin de pouvoir certifier la fiabilité des résultats proposés.

Si tout le monde peut et doit réaliser une analyse de la robustesse de ses résultats par analyse de sensibilité, la mise en œuvre d’analyses d’incertitude de type simulation Monte-Carlo représente encore un effort important d’autant plus difficile à mettre en œuvre dans les cas où l’incertitude est la plus grande par manque de données... sur les données. Dans le cadre d’estimation des données par expertise, il sera donc également important de demander une évaluation de la confiance de l’expert dans sa donnée. Ceci représente un champ de recherche à explorer pour les systèmes de produits horticoles au sud.

2.8. Bilan chiffré des publications

Pour finir ce panorama de mes activités, je propose au tableau suivant un état récapitulatif des publications dans des revues à comité de lecture par année et par revue, classées par ordre d’Impact Factor 2012 (JCR 2012) (chapitre d’ouvrage non répertorié). La liste exhaustive de mes publications est donnée en annexe 2 et une sélection de 5 publications est proposée en annexe 4.

Journal	IF 2012	Année									Total
		2000	2001	2005	2006	2007	2009	2010	2013	2014	
Agron Sustain Dev	3.573									2	2
J Clean Prod	3.398					1		1		2	4
Sc Total Environ	3.258				1						1
Agri Ecosyst Environ	2.859			1	1						2
J Ecol Econ	2.855						1				1
Int J LCA	2.773				1		1		1	1	4
Livestock Prod Sc	1.249			1							1
Water Sc Tech	1.102	1	1								2
Cahiers d’Agriculture	0.305								1		1
Int J Lifecycle Prod Manag	-						1				1
Encyclopedia of Earth	-					1					1
TOTAL		1	1	2	3	2	3	1	2	5	20

3. Projet de recherche

3.1. Enjeux, contraintes et besoins de l'horticulture au sud

Les fruits et légumes représentent une composante très importante d'un régime alimentaire équilibré au Nord comme au Sud. Aujourd'hui la valeur de tous les fruits et légumes commercialisés dans le monde représente plus du double de la valeur des céréales (chiffres FAO (2005) cités par Weinberger et Lumpkin, 2007). L'accroissement de la demande pour les produits horticoles (fruits et légumes) que ce soit au niveau international (productions vouées à l'export) ou au niveau domestique (productions destinées à la consommation locale) offre une opportunité pour les producteurs horticoles du sud d'accroître leurs revenus et de déployer leurs activités (Weinberger et Lumpkin, 2007).

3.1.1. Les productions horticoles d'export

De nombreuses filières de fruits et légumes importés de pays du sud se sont structurées et approvisionnent aujourd'hui les marchés du Nord : Etats-Unis et Europe notamment. On citera par exemple le cas des agrumes du Maghreb, de la banane d'Afrique et d'Amérique Centrale, de la mangue du Brésil, de la tomate du Maroc, de l'ananas du Costa-Rica (Ingwersen, 2012). En Afrique, le Kenya et la Côte d'Ivoire sont devenus deux des principaux pays exportateurs de produits horticoles dans le monde. Dans de nombreux pays d'Afrique, l'horticulture d'export (surtout les légumes et les fleurs coupées) est devenue un secteur plein de promesses dans un paysage agricole maussade (Weinberger et Lumpkin, 2007). Ces systèmes dont les produits sont destinés à des marchés exigeants sont très encadrés et font souvent l'objet de démarche qualité et de certification (GLOBALGAP). Ils ont également souvent des moyens financiers conséquents et embauchent des gestionnaires d'exploitation diplômés qui raisonnent les apports d'intrants en fonction des rendements espérés. Cependant, la demande de ces produits horticoles au Nord a souvent entraîné un développement et une intensification des systèmes de culture associés à des impacts sur les écosystèmes locaux et sur la population (Ingwersen, 2012). Ces filières dynamiques sont conscientes de l'évolution des réglementations et des demandes sociales dans les pays du Nord. Dans ce cadre, elles sont réceptives à, voire anticipent parfois, la demande d'évaluation globale de leurs produits à la fois sur le plan environnemental et social (thèse de Pauline Feschet en bourse CIFRE avec la Compagnie Fruitière sur l'ACV sociale de la banane). Quand la demande en évaluation globale ne vient pas de ces producteurs pour se démarquer, elle provient des marchés eux-mêmes que ce soit au travers d'incitations publiques comme la loi Grenelle 2 sur l'affichage environnemental en France ou d'acteurs privés comme la grande distribution.

La demande en évaluation globale de type ACV est aujourd'hui forte pour les filières horticoles d'export.

3.1.2. Le cas de l'horticulture urbaine et péri-urbaine

D'ici 2030, 60% de la population mondiale vivra en ville (United Nations, 2012). Dans un contexte de croissance démographique urbaine très rapide dans les pays en développement et notamment en Afrique sub-saharienne, l'agriculture urbaine en général et l'horticulture urbaine en particulier sont

présentées comme ayant un gros potentiel pour créer des emplois, générer des revenus, assurer la sécurité alimentaire des citadins et la préservation de leur environnement (FAO, 2012 ; World Bank, 2013 ; Orsini et al. 2013). Concernant l'horticulture urbaine et périurbaine, la contribution à la fourniture en fruits et légumes des habitants des villes est souvent très élevée (jusqu'à 80%) mais ces systèmes souffrent de très nombreuses contraintes et de très peu de soutien de la part des pouvoirs publics (Eriksen-Hamel et Danso, 2010). Cissé et al (2005) dénoncent leur statut légal incertain qui contraste avec la multitude d'acteurs qui interviennent dans leur promotion et leur développement. La contrainte la plus critique de ces systèmes et la plus révélatrice de ce manque de reconnaissance officielle est l'absence de sécurité foncière des producteurs. Si certaines initiatives ont permis de prendre en compte les différentes fonctions de l'agriculture urbaine dans les décisions des urbanistes (Aubry et al. 2012), les responsables de l'urbanisme dans les villes africaines privilégient plus souvent l'usage des terres pour la construction d'habitations en cas de litige.

Dans les systèmes horticoles urbains et périurbains prédominent des cultures à cycle court (maraîchage surtout) et des arbres fruitiers qui ont une forte demande en nutriments et en eau et qui sont très vulnérables aux attaques des ravageurs et maladies. Ces systèmes sont soumis à des contraintes de production spécifiques et importantes, telles que la pression foncière, un environnement de production souvent pollué (sol, air, eau), une demande en recyclage de déchets organiques et d'eaux usées, une pression parasitaire élevée (De Bon et al. 2010 ; Eriksen-Hamel et Danso, 2010).

Dans ce contexte, ces systèmes ont connu une intensification forte, souvent mal maîtrisée, dont les excès et les risques pour l'environnement et la santé humaine commencent à être dénoncés dans la littérature (De Bon et al. 2010 ; Ahouangninou et al. 2012). Des études quantitatives en jardins urbains au Niger ont révélé des bilans en éléments fertilisants très excédentaires en raison d'usages très élevés d'engrais chimiques et/ou organiques (Diogo et al. 2010 ; Predotova et al. 2010) associés à des flux d'émissions gazeuses importants (Predotova et al. 2010) et à des pollutions de l'eau (Predotova et al. 2011). Dans un contexte où le niveau d'éducation et de formation des producteurs est très faible, de mauvaises pratiques phytosanitaires ont également été mises en évidence, comme l'usage de molécules interdites sur maraîchage, de produits achetés au marché noir ou reconditionnés sans notice, des traitements systématiques, excessifs et inappropriés, l'application sans protection par les producteurs, le non-respect du délai avant récolte (Ahouangninou et al. 2011 ; De Bon et al. 2010 ; De Bon et al. 2014). Des pollutions de nappe par les pesticides ont même été observées dans différentes régions africaines comme la région des Niayes au Sénégal (Cissé et al. 2003) et en Côte d'Ivoire (Traoré et al. 2006).

Ces premiers travaux quantitatifs des flux réels en jardins urbains sont très précieux mais ne s'intéressent généralement qu'à une catégorie de problème telle que la gestion des nutriments ou celle des bio-agresseurs et ne mettent pas toujours en regard les risques avec les fonctions remplies par ces systèmes. Devant les bénéfices des jardins urbains invoqués par les uns et les inconvénients dénoncés par les autres, il est difficile de se faire une idée objective d'ensemble. Des innovations techniques sont proposées comme les filets anti-insectes (Taylor et al. 2001 ; Gogo et al. 2014) ainsi que des pratiques agro-écologiques qui présentent des atouts prometteurs sur les plans agronomiques et économiques mais aussi nécessitent un processus d'adoption qui peut être plus ou moins facile (Abate et al. 2000).

Que ce soit pour les systèmes conventionnels ou pour les innovations proposées, un besoin en évaluation globale quantitative et objective est constaté pour permettre une prise de décision éclairée vers des systèmes plus respectueux des hommes et de l'environnement.

Comme présentée dans notre synthèse scientifique, la première évaluation environnementale globale des jardins urbains a été réalisée par Aurélie Perrin dans sa thèse et utilisait l'ACV comme cadre méthodologique. Ce travail de thèse a permis de tester de nombreuses méthodes et ouvert de nombreuses perspectives de recherche tout en fournissant la première étude de référence de type ACV sur les jardins urbains au Bénin (Perrin, 2013). Nous reviendrons sur les principaux acquis et perspectives de cette thèse au chapitre 3.2.

3.1.3. Les systèmes horticoles complexes comme modèles pour l'avenir ?

Dans un contexte où le modèle agronomique dominant (système intensif, monospécifique, hautement dépendant d'intrants chimiques) a pu montrer ses limites : pollution des sols, des eaux et de l'air, baisses de rendement, vulnérabilité aux bioagresseurs, faible rentabilité, de nouvelles stratégies sont nécessaires. Certains systèmes horticoles peuvent représenter des modèles intéressants à étudier. En effet, certains systèmes horticoles complexes qu'on peut trouver par exemple en Haïti (jardins créoles), au Costa-Rica ou à Madagascar (systèmes agro-forestiers) présentent une diversité d'espèces végétales (et parfois aussi animales) qui leur assurerait notamment une meilleure résilience aux bioagresseurs et une moindre dépendance aux intrants chimiques (Malézieux et al. 2009 ; Malézieux, 2011). L'éco-efficience de ces systèmes (capacité à remplir une fonction à moindre coût environnemental) n'a jamais été étudiée par l'ACV et offre un champ de recherche ambitieux et prometteur à la fois pour nourrir les processus d'éco-conception des systèmes de production au Sud et au Nord. Cet axe ne sera pas développé dans mon projet scientifique mais est seulement proposé comme perspective de travail pour l'avenir.

3.2. Enjeux scientifiques et méthodologiques pour l'évaluation et l'amélioration des systèmes horticoles au sud

Les enjeux socio-économiques et environnementaux des systèmes horticoles du sud présentés brièvement ci-dessus nous amènent aux trois grandes questions suivantes :

- Question 1 : Comment évaluer de façon fiable les systèmes horticoles du sud ?
- Question 2 : Comment faire évoluer ces systèmes vers des systèmes plus éco-efficients ?
- Question 3 : Est-il possible d'insérer l'ACV dans une boucle d'éco-conception ?

Sur la base de nos travaux d'évaluation sur les systèmes horticoles d'export et sur les jardins urbains au Bénin présentés en partie 2 de ce rapport, je propose un récapitulatif de nos principaux acquis et des perspectives de recherche associées.

3.2.1. Principaux acquis sur l'évaluation des systèmes horticoles du Sud

Acquis sur les filières d'export : clémentine, mangue, tomate

Prise en compte et exploration de la variabilité et de la diversité des systèmes de production

La comparaison de fruits importés avec des fruits locaux doit se fonder sur un cycle de vie du berceau jusqu'au marché au moins. Ceci afin d'inclure l'allocation des impacts aux fruits de qualité « export », et la phase de transport et de logistique. Les fruits doivent ultimement être comparés sur la base de leur fraction réellement consommable (serving per fruit) (Basset-Mens et al. 2014).

Dans l'étude du système pérenne (fruitiers) en ACV il est nécessaire de modéliser l'ensemble des phases du verger y compris les phases non productives et de baser la description de la phase plateau sur au moins 6 ans de données (Bessou et al. 2014).

Compte tenu de la lourdeur d'une telle collecte de données, l'exploration de la variabilité des pratiques sur culture de mangue au Brésil n'a pas été possible dans un premier temps et nous n'avons pas pu atteindre un bon niveau de représentativité des pratiques phytosanitaires (Basset-Mens et al. 2014).

Estimation des flux au champ

Les méthodes d'estimation des flux par défaut (ex. méthode AGRIBALYSE) ne sont pas valides pour ces systèmes très spécifiques qu'il s'agisse des fruitiers tropicaux ou des systèmes maraîchers sous serre.

En plus des flux de nutriments et de pesticides, les flux d'eau et de sels doivent être estimés en cohérence avec les autres flux, en tenant compte des pratiques, du sol et du climat afin de pouvoir modéliser proprement leurs impacts associés (Payen et al. 2014a).

Prise en compte des impacts prépondérants

Pour comparer de manière exhaustive les produits issus des filières d'export (le plus souvent irrigués) avec leurs équivalents locaux la prise en compte des impacts liés à l'usage d'eau pour l'irrigation est incontournable (Payen et al. 2014a).

Les modèles de caractérisation de ces impacts en ACV présentent des carences méthodologiques qui conduisent vraisemblablement à sous-estimer les impacts. De plus, les phénomènes de salinisation sont ignorés (Payen et al. 2014a ; Payen et al. 2014b).

Eco-efficience des systèmes et points critiques

Ces conclusions sont présentées dans le tableau 5 du chapitre 2.6.

Acquis sur la tomate en jardin urbain au Bénin (thèse Aurélie Perrin)

Prise en compte et exploration de la variabilité et de la diversité des systèmes de production

Dans un contexte de pénurie en données, une typologie à dire d'expert sur l'ensemble des producteurs de tomate en jardin urbain du sud Bénin a été développée. Les principaux types de système de culture de tomate ont été identifiés et caractérisés permettant un échantillonnage de 12 parcelles couvrant l'essentiel de cette diversité (Perrin et al. 2014b).

Une méthodologie de création de données d'inventaire fiables pour l'ACV en contexte de pénurie en données a également été formalisée (Perrin et al. 2014b).

Estimation des flux au champ

Une méthode d'estimation des flux par facteurs d'émission par défaut (c'est-à-dire en l'absence de données et références plus spécifiques au cas d'étude), proposant les meilleures méthodes disponibles pour de tels systèmes a été formalisée (Perrin et al. 2014a) et appliquée (Perrin et al. 2014b).

Une démarche alliant l'utilisation du modèle STICS et du bilan d'azote a permis d'explorer la variabilité des émissions d'azote au champ, les principaux paramètres de pratique et de sol responsables de cette variabilité, d'invalidier l'hypothèse de stabilité de la matière organique des sols dans ces systèmes et de porter un regard critique sur les facteurs d'émission par défaut.

L'usage du modèle STICS a apporté des éclairages précieux sur les flux d'azote au champ et les déterminants biophysiques et techniques de ces flux mais son utilisation reste très lourde dans tous les cas et a fortiori en contexte tropical. Des modèles plus simples d'utilisation, intégrant seulement les paramètres les plus influents des émissions doivent être développés pour faciliter des ACV robustes dans ces contextes.

L'usage du modèle STICS n'a eu qu'une valeur exploratoire et non prédictive en l'absence de données de flux mesurés pour valider les simulations. Des campagnes de mesure des flux au champ sous ces cultures en conditions tropicales sont nécessaires.

Enfin, la démarche appliquée sur les émissions d'azote réactif au champ est nécessaire également pour les émissions de pesticides vers les différents compartiments de l'environnement y compris le compartiment plante qui sera ultimement ingéré par le consommateur.

Eco-efficience des systèmes et points critiques

Les données agronomiques, les résultats d'inventaire et d'impact ont été agrégés par modalité de la typologie, par type et enfin pour un système moyen pondéré (par la surface de chaque type).

Les principales conclusions de cette évaluation sont résumées dans le tableau 5 du chapitre 2.6.

Dans un contexte de production très contraignant pour les producteurs, la faible performance des systèmes et les forts risques pour l'environnement et la santé humaine constatés n'ont pas pu être complètement expliqués par notre analyse sur un seul cycle de production à l'échelle du système de culture. Un certain nombre de déterminants de la performance du système de culture se trouve sans doute à l'échelle de l'exploitation, unité décisionnelle cohérente de l'agriculteur (aspects socio-économiques). Il serait donc profitable de pouvoir croiser l'analyse très détaillée à l'échelle de la parcelle avec une typologie à l'échelle de l'exploitation.

3.2.2. Perspectives de recherche

Sur la base de ce premier cycle de travail et de cette analyse des premiers acquis on comprend que le nombre et l'ampleur des défis scientifiques pour appliquer de façon fiable l'ACV aux systèmes horticoles du sud sont considérables (1^{ère} question).

De façon générale, les questions scientifiques devant nous sont :

Intégrer/explorer/valoriser la diversité des systèmes :

- Comment combiner dans un cadre d'évaluation environnementale par l'ACV, une prise en compte de la diversité des systèmes de culture avec une typologie à l'échelle de l'exploitation ?
- Comment identifier et évaluer par l'ACV des systèmes pérennes potentiellement innovants et plus respectueux de l'environnement malgré la lourdeur de leur modélisation ?
- Quelles innovations agronomiques pour réduire les impacts liés aux excès de nutriments et de pesticides et à la consommation d'eau douce ?

Inventaire des flux vers l'environnement :

- Comment mettre au point un outil simplifié et opérationnel d'estimation des flux d'azote, de sel et d'eau au champ ?
- Quelle modélisation des émissions de pesticides au champ tenant compte des spécificités des systèmes horticoles en contexte tropical et semi-aride ?

Modélisation des impacts régionaux en ACV :

- Quelle prise en compte des impacts liés à l'utilisation d'eau douce ?
- Quel cadre conceptuel pour une prise en compte cohérente de la salinisation en ACV ?

Comment étudier par l'ACV les systèmes horticoles complexes et quels enseignements en tirer ?

- Comment définir les fonctions de ces systèmes et leurs unités fonctionnelles associées ?
- Comment collecter des données d'inventaire représentatives ?
- Comment estimer les flux au champ ?
- Comment allouer les impacts aux différentes fonctions ?
- Quelles connaissances nouvelles pour l'éco-conception de systèmes agricoles au nord comme au sud ?

Comment insérer l'ACV dans une boucle d'éco-conception (participative) ?

3.3. Projet scientifique

Suite à ces perspectives, je propose une présentation détaillée des défis que nous choisissons de relever à court terme (3-5 ans). Le choix de ne se focaliser que sur quelques défis à court terme est dicté par la nécessité pour moi de me renforcer scientifiquement sur certaines disciplines : notamment les méthodes de typologie, les impacts liés aux usages d'eau douce et la modélisation des flux de pesticides et de leurs impacts associés. Le projet à court terme comporte deux axes :

Axe 1 : Comment évaluer et améliorer les systèmes maraîchers urbains en Afrique de l'Ouest

Axe 2 : Vers une meilleure prise en compte des impacts liés aux usages d'eau douce en système horticole – la prise en compte de la salinisation

3.3.1. Comment évaluer et améliorer la performance des systèmes maraîchers urbains en Afrique de l'Ouest

Face aux enjeux du maraîchage urbain en Afrique de l'Ouest évoqués au paragraphe 3.1.2., aux acquis de la thèse d'Aurélié Perrin, et en cohérence avec le projet de l'unité Hortsys, je souhaiterais réunir une équipe pluridisciplinaire pour relever le défi de l'évaluation et de l'amélioration des systèmes maraîchers urbains en Afrique de l'Ouest. Dans cette équipe, plusieurs collègues de l'unité Hortsys seraient impliqués : notamment des agronomes (ex : Joël Huat, Serge Simon), des économistes (Laurent Parrot), des entomologistes (ex : Alain Ratnadass, Thibaud Martin), des collègues de l'université Abdou Moumouni de Niamey de laquelle émane une demande de collaboration forte et prometteuse en la personne du Docteur en chimie Rabani Adamou ainsi que des collègues du pôle Elsa (Ralph Rosenbaum) et d'autres laboratoires européens (probablement du DTU au Danemark). Les deux grands thèmes scientifiques novateurs que nous souhaitons explorer dans ce cadre sont :

1. L'analyse des déterminants de la performance environnementale et économique des systèmes maraîchers urbains
2. La modélisation des émissions de pesticides au champ et de leurs impacts associés

Après une brève présentation de l'état de l'art et des enjeux méthodologiques et scientifiques associés à chacun de ces thèmes, je présenterai la démarche que nous proposons pour atteindre ces objectifs. Les moyens envisagés pour atteindre ces objectifs seront notamment plusieurs thèses réunies dans un projet cohérent à soumettre pour financement prochainement avec l'équipe décrite ci-dessus et a minima sur le cas d'étude des productions maraîchères de la vallée du Niger.

Analyse des déterminants de la performance des systèmes maraîchers urbains en Afrique de l'Ouest

En agronomie, l'échelle d'étude la plus fréquente est celle de la parcelle (Doré et al. 1997 ; Huat, 2008). C'est également vrai en ACV des produits agricoles. C'est à cette échelle qu'est gérée la culture, que peuvent être globalement inventoriées les flux de ressources qui lui sont dédiés, les émissions qui lui sont allouées et le rendement (la réalisation de la fonction). C'est donc à cette échelle que nous avons conduit notre première ACV de la tomate en zone urbaine au Bénin (Perrin, 2013). Les agronomes et les économistes ont également identifié depuis longtemps que la performance du système de culture, en plus d'être dépendante des conditions du milieu et des pratiques, dépend des décisions et moyens déployés au niveau de l'exploitation (Dossa et al. 2011). Il en va de même de l'ensemble des déterminants de la performance du système et de ses flux vers l'environnement. L'inventaire des ressources utilisées et des émissions au champ dépend donc de la diversité et de la variabilité à ces deux niveaux d'organisation. C'est le constat que nous ont amené à faire également nos difficultés d'interprétation des résultats d'ACV pour la tomate du Bénin. Les systèmes de maraîchage urbains en Afrique de l'Ouest sont insérés dans des systèmes de production complexes et multi-activités (Dossa et al 2011). Pour relever le défi de leur évaluation mais aussi de leur amélioration, la prise en compte de la diversité des systèmes de culture et des exploitations dans lesquelles ils s'inscrivent apparaît comme une piste de travail importante.

Face à la diversité des systèmes de production et dans l'absolu l'unicité de chacun, le recours à des méthodes de typologie pour créer des groupes relativement homogènes au sein de leur population est un outil indispensable et puissant. Une bonne typologie cherchera à maximiser l'homogénéité à l'intérieur des types et à maximiser l'hétérogénéité entre les types (Köbrich et al. 2003). Comme l'explique Aurélie Perrin dans sa thèse : les méthodes de typologie ont été formalisées et employées pour étudier de très nombreux aspects de la performance et de l'amélioration des systèmes de production agricoles (Landais, 1998 ; Poussin et al. 2008), pour concevoir des systèmes de production innovants (Blazy et al. 2009) ou pour analyser les déterminants de leur adoption (Bidogeza et al. 2009). Sur les systèmes qui nous intéressent, Dossa et al (2011) ont proposé une approche de typologie des systèmes urbains et périurbains en Afrique de l'Ouest incluant le contexte socio-économique, environnemental et institutionnel de l'agriculture urbaine. Cependant, l'organisation d'une population en types homogènes dépendra des critères et objectifs de la typologie.

Voici les principales étapes que nous proposons pour analyser et exploiter les déterminants de la performance des systèmes maraîchers dans leur évaluation globale :

1. A l'aide d'enquêtes sur un grand échantillon d'exploitations, notre premier objectif sera d'étudier et de structurer la population des producteurs de façon pertinente par rapport à leur performance agronomique, environnementale et économique afin d'identifier des systèmes potentiellement prometteurs ou innovants pour améliorer cette performance.
2. Un échantillonnage à l'échelle de la parcelle cette fois pour quelques produits maraîchers emblématiques sera ensuite réalisé afin de couvrir la diversité de milieux et de pratiques de la zone d'étude.
3. Sur cet échantillon de parcelles, un inventaire quantitatif des flux entrants et sortants des systèmes courants et potentiellement innovants sera réalisé selon le protocole proposé par Perrin et al (2014b).

4. Appuyées sur cet inventaire, une évaluation environnementale globale par l'ACV et si possible une analyse coût-bénéfice seront également réalisées pour ces produits.
5. Enfin, une fois ces évaluations réalisées, un travail de discussion et de mise en perspectives par rapport à la typologie d'exploitations initiale sera proposé pour compléter la compréhension des déterminants des impacts environnementaux et de la rentabilité des systèmes étudiés.

Deux thèses pourront être planifiées sur ce programme, l'une sur « l'analyse des déterminants de la performance environnementale et économique à l'échelle de l'exploitation » et l'autre sur « l'évaluation quantitative à l'échelle de la parcelle au travers des outils ACV et analyse coûts-bénéfices ».

Quelle modélisation des émissions de pesticides au champ et de leurs impacts associés ?

Etat de l'art sur la toxicité due aux pesticides en ACV

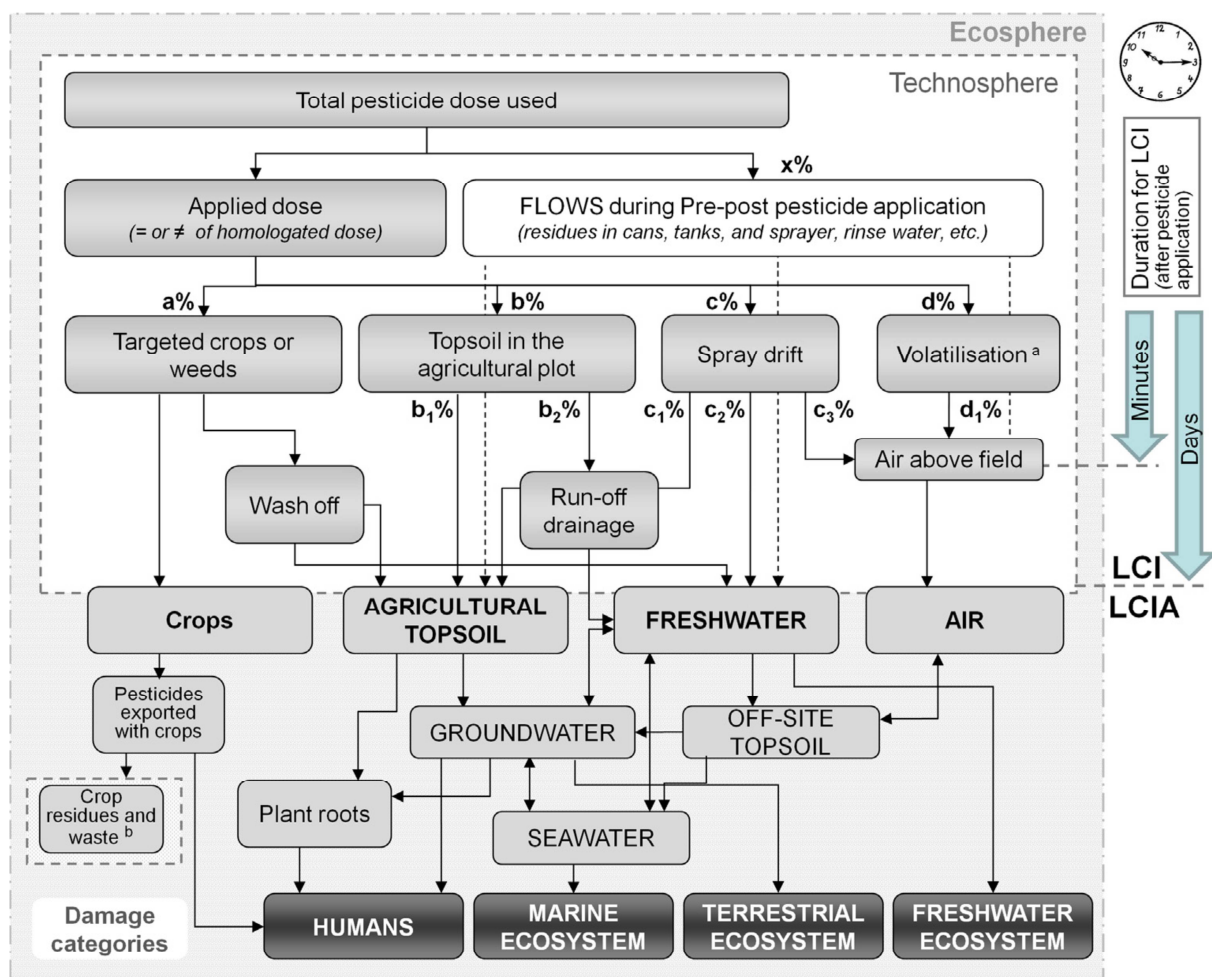
La recherche sur la modélisation des impacts toxicité humaine et écotoxicité en ACV est assez ancienne et est héritée du champ de l'évaluation des risques (risk assessment). De nombreux modèles ont été développés et comparés en 15 ans et sont cités par Rosenbaum et al (2008). Les approches les plus pertinentes proposent des modèles multi compartiments et multi chaines de cause à effet pour modéliser le devenir et l'exposition des polluants. Les principales sources de variation des facteurs de caractérisation ont pu être identifiées que ce soit pour le devenir, l'exposition ou l'effet des molécules polluantes. Un modèle consensuel a vu le jour en 2008 : USEtox, sous l'impulsion de l'initiative UNEP-SETAC dédiée à la toxicité et regroupant l'ensemble des développeurs des modèles précédents (Rosenbaum et al ; 2008). Le modèle USEtox est valide pour des évaluations génériques sur toute la planète et possède 6 compartiments : air urbain, air rural, sol agricole, sol industriel, eau douce et eau côtière marine. Il n'évalue les impacts que sur la santé humaine et l'écotoxicité des eaux douces pour lesquels il est le modèle recommandé par l'ILCD (EC-JRC, 2011). La précision des simulations de facteurs de caractérisation pour chaque molécule individuelle est passée d'une douzaine d'ordre de grandeur entre les résultats des différents modèles à des ordres de grandeur de 2 à 3 avec le modèle USETOX. En plus de ne pas évaluer l'écotoxicité terrestre et marine, USEtox n'inclut pas de processus de dégradation des pesticides sur la végétation ce qui surestime l'exposition des êtres humains par consommation de produits agricoles. Dans son rapport de recommandations des méthodes de caractérisation des impacts, l'EC-JRC considère USEtox comme non valide pour les applications directes de pesticides (et de métaux) sur les cultures en ce qui concerne les impacts sur la santé humaine. L'évolution du modèle USEtox se poursuit pour accroître sa pertinence scientifique, le nombre des molécules caractérisées y compris des molécules difficiles à modéliser comme les métaux ou les acides et bases organiques (van Zelm et al. 2013), permettre l'évaluation de l'écotoxicité terrestre et marine. D'autres modèles tels que USES-LCA (ReCiPe) ou IMPACT2002+ proposent une évaluation de l'écotoxicité terrestre mais basée sur des données aquatiques c'est-à-dire assimilant le sol à une sorte de lac. De plus, ces deux modèles ne sont paramétrés que pour l'Europe.

Globalement, on retiendra que seul USEtox a une validité mondiale et qu'aucun modèle n'est réellement pertinent pour l'écotoxicité terrestre. Les modèles de caractérisation les plus consensuels de la toxicité en général ne sont pas les plus pertinents pour représenter les impacts directs liés aux apports de pesticides et de métaux aux cultures bien que cette voie d'exposition soit reconnue comme la plus importante pour les impacts sur l'homme. Des modèles dynamiques de prélèvement par les plantes ont été mis au point pour quantifier les impacts sur l'homme de l'ingestion de pesticides par les aliments consommés. L'un des plus récents est DynamiCROP, proposé par Fantke et al (2011). Basé sur 6 plantes modèles : céréales, riz, plante maraîchère (tomate), légume feuille (laitue), arbre fruitier (pomme) et tubercules (pomme de terre), ce modèle différencie les facteurs de caractérisation selon la culture, la substance ainsi que le temps entre l'application et la récolte. Ces travaux démontrent que si les voies d'exposition diffuses, c'est-à-dire par l'air et l'eau, peuvent être importantes pour les applications de pesticide précoces, celles-ci sous-estiment fortement l'ingestion humaine pour les applications de pesticide tardives avant récolte. Un facteur prépondérant est la date d'application avant récolte. Les auteurs mettent également en évidence les plantes les plus à risque avec les légumes feuilles, les produits maraîchers et les fruits. Il est bon de rappeler que

d'autres approches que l'ACV, telles que les analyses de risque ou les études d'impact, peuvent être parfois plus adaptées pour évaluer des impacts localisés sur la santé humaine associés à des pics d'exposition individuelle.

Concernant les méthodes d'estimation des émissions de pesticides au champ et leur cohérence avec les modèles de caractérisation, une analyse critique a été proposée récemment par van Zelm et al (2014). Les auteurs expliquent que l'on dispose soit de facteurs d'émission simplifiés (uniques) indépendants des pratiques, du climat et du sol (Audsley et al, 2003 ; Nemecek et Kägi, 2007) soit d'un modèle assez complexe proposé par le Danish Technical University (DTU) du Danemark : PestLCI (Birkved et Hauschild, 2006 ; Dijkman et al. 2012). Van Zelm et al (2014) ont mis en évidence que les limites du modèle PestLCI (inventaire) n'étaient pas en cohérence avec les limites des modèles de caractérisation des impacts tels que USEtox (impact). Le sol étant défini comme faisant partie de la technosphère dans PestLCI, aucune émission vers le sol en tant que cible environnementale n'est comptabilisée alors que le modèle USEtox peut modéliser le devenir d'émissions vers les sols agricoles notamment. Dans PestLCI, la parcelle agricole est perçue comme un « écosystème profondément manipulé » sur lequel on applique intentionnellement des polluants pour contrôler des bioagresseurs. On exclut donc ainsi le sol cultivé de l'environnement réel à protéger. Un tel postulat peut-être recevable pour une production agricole intensive mais beaucoup moins pour des modes de production alternatives comme une production biologique, qui n'appliquent peu ou pas de pesticides, et qui au contraire s'appuient pour produire sur le sol comme milieu de vie avec une riche biodiversité. PestLCI v 2.0.4, version la plus récente du modèle, possède une base de données pour 94 matières actives, 25 profils de climats européens et 7 profils de sol européens (Dijkman et al. 2012).

Van Zelm et al (2014) ont proposé des limites spatiales et temporelles pour la technosphère dans le cadre des émissions de pesticides (Figure 12). Ces limites sont en accord avec les travaux expérimentaux de mesures de flux dans ce domaine permettant une acquisition de données cohérente pour l'inventaire en ACV. Ces limites permettraient également de mieux prendre en compte d'éventuelles bonnes ou mauvaises pratiques, de comptabiliser des émissions et impacts dans les sols et donc de permettre une comparaison plus pertinente de modes de production très contrastés comme le conventionnel et le bio. Enfin, ces limites permettraient de résoudre le gap existant entre les modèles d'inventaire et d'impacts. Ces nouvelles recommandations pour être suivies impliquent une adaptation des modèles actuels d'inventaire et d'impact. Sur l'impulsion notamment de la DTU, de Quantis et de Syngenta, la communauté des chercheurs et industriels concernés par la question de la modélisation des pesticides s'est réunie au cours de deux workshops : Glasgow 2013 et Bâle 2014, pour aborder la question de la définition de limites consensuelles entre technosphère et écosphère et pour définir des facteurs d'émission opérationnels pour une gamme de situations de production types en contexte tempéré. L'importance d'une recherche de consensus et d'harmonisation dans ce domaine est donc aujourd'hui largement partagée et l'on devrait pouvoir atteindre rapidement un consensus permettant une meilleure prise en compte de l'effet des pratiques agricoles dans le contexte tempéré.



^a Volatilization from crops and soil just after spraying

^b Excluded as this considers separate life cycle of waste or by-products (used for biofuels, buildings materials, burning, etc.)

Figure 12. Limites spatiales et temporelles de la technosphère proposées par van Zelm et al (2014) pour l'estimation des flux de pesticides au champ.

Validité pour les systèmes horticoles au sud ?

En ce qui concerne la prise en compte des impacts liés aux émissions de pesticides en horticulture en général, nos travaux de revue bibliographique révèlent un taux d'inclusion faible justifié le plus souvent par une absence de méthode opérationnelle et consensuelle ou par la trop grande incertitude des méthodes de caractérisation des impacts toxicité. Par exemple, sur les systèmes maraîchers, Perrin et al (2014a) n'ont comptabilisé que 3 études sur 10 qui prenaient en compte explicitement les émissions de pesticides. Pour estimer les émissions de pesticides de leurs systèmes, les trois études ont employé les cadres méthodologiques successifs proposés par le DTU. Boulard et al (2011) et Antón et al (2005) ont utilisé la méthode mise au point par Antón et al (2004) pour les serres, méthode basée sur le cadre de Hauschild (2000). De Backer et al (2009) ont utilisé la version 1 du modèle PestLCI (Birkved et Hauschild, 2006). Pour les systèmes de production fruitière, le taux d'études que nous avons analysées qui incluent explicitement les pesticides est un peu plus élevé (Bessou et al. 2013) en lien avec plusieurs travaux de thèse sur pomme (Mila i Canals, 2003 ; Mila i Canals et al. 2006 ; Mouron et al. 2006) et un projet européen sur l'huile d'olive : ECOIL (<http://www.ecoil.tuc.gr/default.html>, Avraamides et Fatta, 2008) permettant des travaux plus approfondis que la plupart des études ACV. Le cadre méthodologique le plus cité est encore une fois

celui de Hauschild (2000). Sur produits horticoles au sud, une étude ACV récente sur l'ananas du Costa-Rica a pris en compte les impacts liés aux émissions de pesticides grâce à une application paramétrée aux conditions locales de sol et de climat des modèles PestLCI v1 et USEtox (Ingwersen, 2012).

Acquisition de données et modélisation des flux de pesticides en maraîchage urbain en Afrique de l'Ouest

Dans le contexte scientifique évoqué précédemment, il apparaît primordial de rester membre actif du groupe d'experts sur la construction d'un consensus sur la prise en compte des impacts liés aux pesticides. Cependant, les membres et objets d'étude de ce groupe sont pour le moment strictement issus du contexte tempéré. Tout reste à faire pour les systèmes horticoles au sud.

Dans le cadre de la dynamique initiée par mon collègue Rabani Adamou (chimiste à l'Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger) sur l'évaluation et l'amélioration des systèmes maraîchers de la vallée du Niger, nous souhaitons proposer un projet de thèse sur l'acquisition de données et la modélisation des flux de pesticides au champ dans un cadre ACV. Ce travail serait à l'interface entre les disciplines de la mesure des flux dans l'environnement (Adamou et al. 2011), et de la modélisation des émissions dans un cadre ACV pour laquelle des partenariats avec des collègues du pôle Elsa (Ralph Rosenbaum) et vraisemblablement du DTU seront construits.

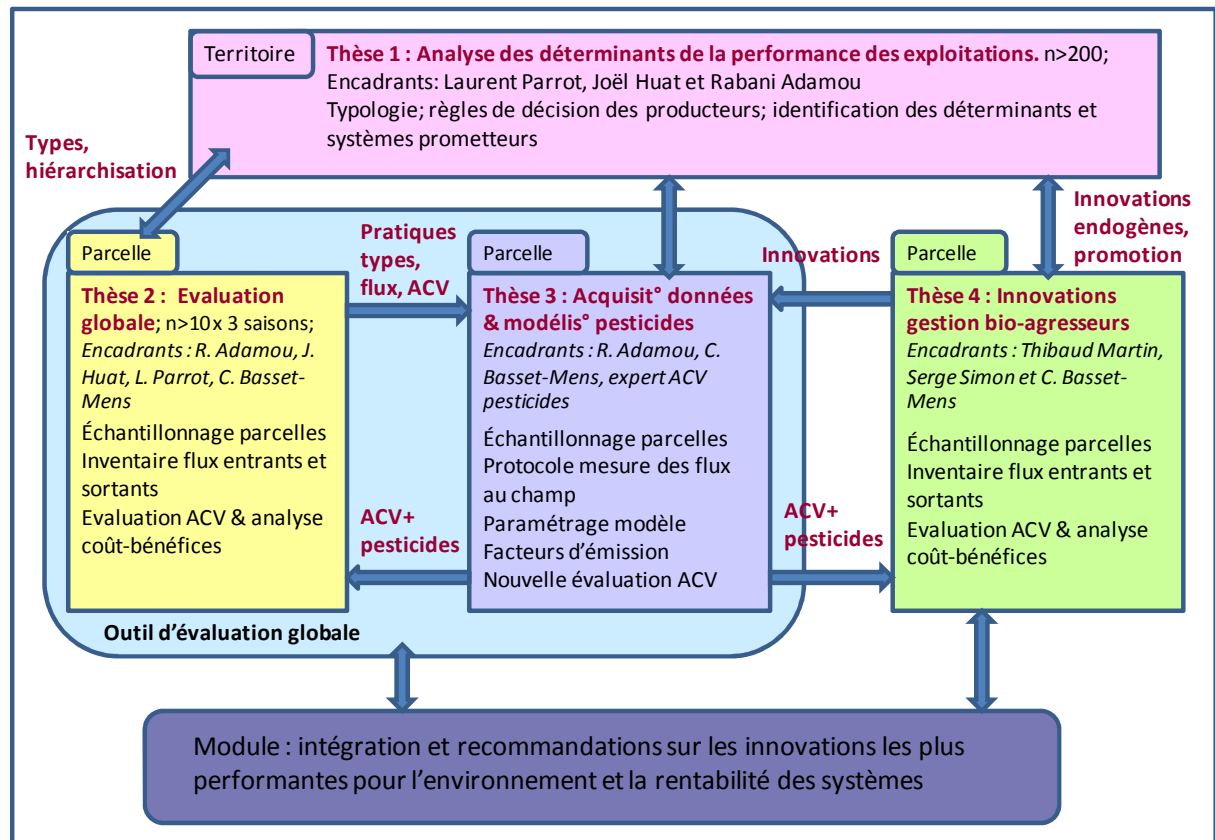
Les principales étapes de ce projet seraient les suivantes :

- Revue des données expérimentales disponibles et de la validité des modèles de flux de pesticides au champ disponibles pour des contextes de production horticole en contexte tropical, aride et semi-aride
- Mise en place d'un protocole de mesures de flux au champ pour une gamme de situations de production maraîchère dans la vallée du Niger
- Prise en main, adaptation et paramétrage d'un modèle d'estimation des flux (tel que PestLCI) aux conditions de production maraîchère dans la vallée du Niger
- Proposition de facteurs d'émission pour une gamme de situations typiques de sol, climat et pratique en production maraîchère dans la vallée du Niger
- Calculs et discussion des résultats d'ACV pour les systèmes maraîchers de la vallée du Niger (jeu de données de la thèse évaluation globale) avec différentes méthodes d'estimation des flux de pesticides et d'impacts.

Innovations en systèmes maraîchers urbains au Niger

Des innovations prometteuses pour réduire l'usage de produits phytosanitaires ont été testées en systèmes maraîchers en Afrique par nos collègues Serge Simon, Thibaud Martin et Alain Ratnadass tels que les filets anti-insectes et les techniques de « Push-Pull ». Une 4^{ème} thèse pourrait être envisagée sous leur supervision pour tester ces techniques dans le contexte du maraîchage dans la vallée du Niger. Ces technologies pourraient être évaluées à l'aide de l'outil d'évaluation globale de la rentabilité et des impacts environnementaux (y compris la nouvelle méthode d'évaluation de la toxicité liée aux pesticides) mis au point dans le cadre du projet.

Schéma intégrateur du projet pour l'évaluation et l'amélioration de la performance des systèmes maraîchers dans la vallée du Niger



3.3.2. Vers une meilleure prise en compte des impacts liés aux usages d'eau en système horticole – la prise en compte de la salinisation (Thèse Sandra Payen)

L'effort de recherche sur la modélisation des impacts liés à l'usage d'eau douce en ACV bien que récent n'en est pas moins très dynamique et productif. Il est accompagné d'une initiative conjointe de l'UNEP et de la SETAC pour le développement de la méthodologie formalisée en un groupe d'experts appelé WULCA (Water Use in LCA). Sandra Payen est membre de ce groupe. Les débats sur les indicateurs pertinents, leur mode et échelle de calcul sont très actifs (Pfister et al. 2009 ; Boulay et al. 2011b ; Berger et Finkbeiner, 2012 ; Kounina et al. 2013 ; Tendall et al. 2013). En quelques années, une modélisation assortie de facteurs de caractérisation annuels régionalisés pour l'ensemble de la planète (des Water Stress Index - WSI) ont été produits (Pfister et al. 2009) et sont déjà remplacés par des facteurs plus pertinents. Notamment, Pfister et Bayer (2014) ont développés des facteurs de caractérisation mensualisés pour tenir compte de la variabilité intra-annuelle des climats. Berger et al. (2014) modélisent le cycle de l'eau de façon plus pertinente en intégrant la part d'eau retombée sur le bassin versant d'origine par rapport à la part d'eau définitivement perdue pour ce bassin versant. Devant une telle mobilisation, on peut espérer à échéance de quelques années des indicateurs et des facteurs de caractérisation consensuels pour les impacts liés à l'usage d'eau douce en ACV. Cependant, ce que Payen et al (2014a) ont identifié comme carences importantes concerne :

1. La quasi absence de travaux sur la phase d'inventaire des flux
2. L'absence de prise en compte des phénomènes de salinisation

Afin d'assurer un travail cohérent à la fois sur les phases d'inventaire et d'impact, un travail préliminaire pour définir un cadre conceptuel de prise en compte de la salinisation en ACV a été programmé.

Proposition d'un cadre de prise en compte de la salinisation en ACV (thèse Sandra Payen)

Comme exposé dans notre synthèse au chapitre 2.5.4, après avoir recensé l'ensemble des mécanismes de salinisation avec son groupe d'experts en salinisation (figure 10), constaté la portée réduite des quelques tentatives de prise en compte de la salinisation en ACV, Sandra Payen, dans sa communication à la conférence LCAFood 2014, a analysé comment prendre en compte la salinisation des sols et des eaux de façon cohérente en ACV. Elle a également identifié dans ce champ plusieurs questions actuellement en débat dans la communauté ACV. La première concerne la définition des limites entre le système étudié et l'environnement, qui pose aussi la limite entre les phases d'inventaire et d'évaluation des impacts (figure 13). La question de la limite entre le système étudié et l'environnement est critique pour développer une démarche de modélisation cohérente entre les phases d'inventaire et d'évaluation d'impact et d'autant plus que des incohérences existent à l'heure actuelle pour certaines catégories d'impacts (van Zelm et al. 2014). La seconde question importante est la stratégie de modélisation des impacts en lien avec la consommation des ressources naturelles que sont l'eau et les terres. La grande difficulté de ce travail sur la salinisation est qu'il touche à plusieurs domaines de l'ACV extrêmement complexes et encore en débat. Partant d'un objectif d'amélioration de la modélisation des impacts liés à l'usage d'eau douce, nous avons réalisé que la question du sol était également impliquée dans le cadre des phénomènes de salinisation. Nous avons

là sans doute les deux thèmes de recherche à la fois les plus complexes et les plus productifs du moment.

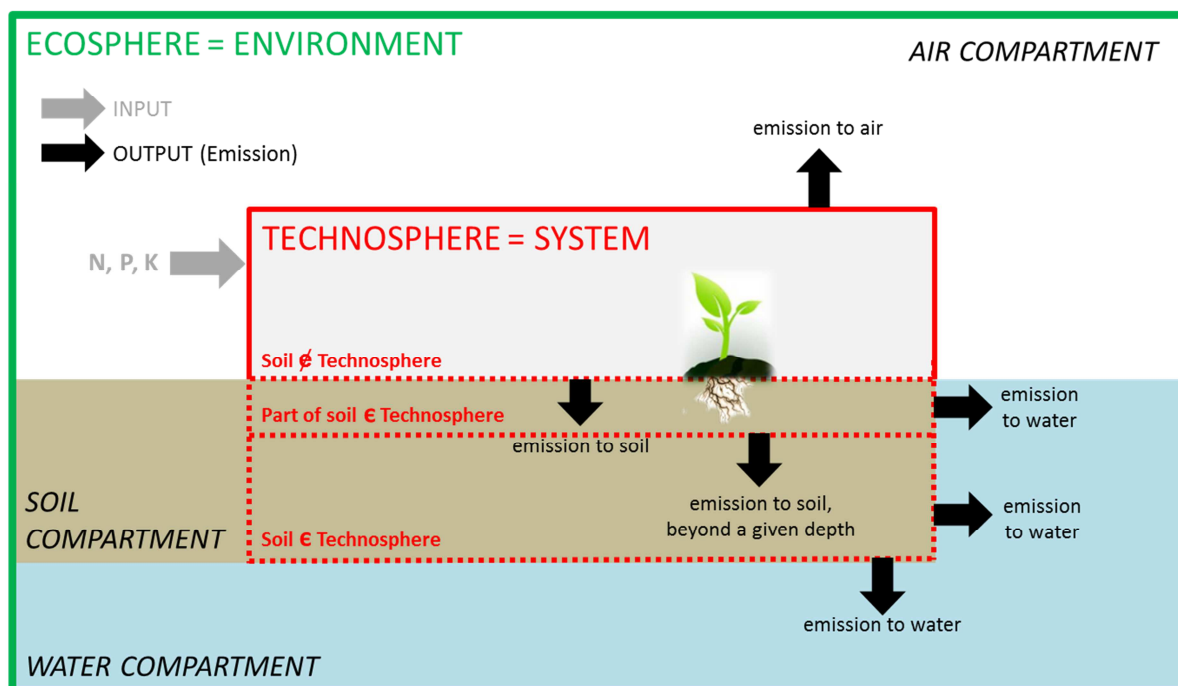


Figure 13. Schéma d'illustration (Sandra Payen) des différentes possibilités de définition de la limite entre le système étudié et l'environnement. Cette limite permet de définir une émission (flux quittant le système pour aller dans un compartiment environnemental) et où commence la phase de modélisation des impacts.

En ACV, on modélise historiquement principalement des impacts liés à des émissions dans les compartiments de l'environnement et qui incluent des processus d'émission, de devenir, d'exposition et d'effet. Plus récemment, ont été étudiés les impacts liés à l'utilisation de ressources biotiques comme les terres et l'eau (Finnveden et al. 2009). Il peut s'agir d'impacts sur la santé des écosystèmes, sur la santé humaine et sur la ressource. Pour comprendre que cette modélisation ait pour cibles la santé humaine et la santé des écosystèmes comme aires de protection alors qu'on parle d'une consommation de ressource, il faut savoir que l'aire de protection « Ressources » concerne les impacts sur la raréfaction des ressources (par compétition, dispersion ou dégradation) pour les générations futures. Les impacts liés à la consommation de ressources sur les populations et les écosystèmes actuels sont associés aux aires de protection « Santé des écosystèmes » et « Santé humaine ».

Une stratégie de modélisation spécifique est nécessaire pour les impacts liés au prélèvement dans l'environnement ou à l'usage d'une ressource biotique.

Sur la consommation de l'eau Boulay et al (2011 a et b) ont développé une méthode permettant de prendre en compte les impacts sur la santé humaine en lien avec la consommation d'eau au travers d'une catégorisation de l'eau en fonction de ses fonctionnalités et de sa qualité. La méthode permet donc d'intégrer la dimension qualitative de l'eau dans la modélisation de sa rareté.

La recherche sur les impacts liés à l'utilisation des terres et la qualité des sols est plus ancienne en ACV (Cowell et Clift, 2000) mais elle a connu une accélération au cours des dernières années depuis notamment le lancement de l'initiative conjointe UNEP-SETAC « LULCIA » en 2007 (Mila i Canals et al. 2007 et voir numéro spécial du International journal of LCA 2013 sur les travaux et recommandations de cette initiative). Certains travaux se sont concentrés sur la définition des indicateurs de qualité du sol dont Corson (2012) propose une belle synthèse ainsi qu'une contribution scientifique sur la mise au point de trois indicateurs : érosion, changement de matière organique du sol et tassement. D'autres approches coordonnées dans le cadre du groupe LULCIA et reposant sur de nombreux travaux de recherche extrêmement intéressants vont plus loin en cherchant à modéliser les dommages engendrés par l'utilisation des terres sur la biodiversité et les services écosystémiques. Ces travaux ont permis d'aboutir à des facteurs de caractérisation régionalisés sur la planète (Koellner et al. 2013). Cependant, en créant un lien direct entre le mode d'usage des terres, au travers d'une typologie d'usages de plus en plus fine en fonction de la région et des pratiques, et la biodiversité (de Baan et al. 2013) on inclut implicitement tous les impacts même les impacts liés aux émissions de polluants. Or, les impacts des émissions sont par ailleurs déjà modélisés dans les modèles de caractérisation plus classiques comme ceux de l'écotoxicité (ex. USETOX). Un risque de double-comptage apparaît aujourd'hui entre les travaux sur la modélisation des impacts liés à l'usage des terres et les modèles existants en ACV sur le principe du suivi d'une émission jusqu'à une cible environnementale.

Les travaux de modélisation des impacts liés à la consommation des ressources biotiques sont encore partiels, notamment pour l'eau, voire controversés. L'inclusion de ces impacts bouleverse jusqu'au cadre conceptuel de l'ACV. Par exemple, dans une recherche de mise en cohérence avec les terminologies du Millenium Ecosystem Assessment, le groupe UNEP-SETAC LULCIA propose de définir les services écosystémiques comme nouvel endpoint en parallèle de la biodiversité pour l'aire de protection santé des écosystèmes. Il semble que certaines des stratégies proposées soient incompatibles à terme les unes avec les autres et un travail d'harmonisation est aujourd'hui nécessaire pour éviter les double-comptages d'impacts.

Dans ce contexte de recherche conceptuelle complexe, l'objectif de Sandra est d'affiner son analyse des pistes de modélisation possibles pour la salinisation en ACV et de proposer des réponses consensuelles aux questions méthodologiques soulevées. Ces propositions ont l'ambition de faire avancer le débat sur la recherche d'une harmonisation et permettront d'étendre le papier de conférence en un papier à soumettre dans un journal scientifique tel que : International journal of LCA.

Payen, S., Basset-Mens, C., Follain, S., Grünberger, O., Marlet, S., Núñez, M., Perret, S. 2014. Pass the salt please! From a review to a theoretical framework for integrating salinization impacts in food LCA. To be submitted to International Journal of LCA

Pour donner une valeur consensuelle à ces propositions, nous impliquerons de nouveaux experts dans ce travail, notamment nos collègues du pôle ELSA : Ralph Rosenbaum, Montse Nunez et Philippe Roux.

Quelle méthode d'estimation des flux de sel et d'eau pour quelle ACV ? (thèse Sandra Payen)

Devant le manque de méthodes opérationnelles pour estimer les flux au champ y compris l'eau et les sels tenant compte des facteurs les plus influents de pratiques, de sol et de climat, Sandra Payen a d'abord exploré l'applicabilité et la pertinence d'un modèle de culture prometteur : SaltMed (Ragab, 2002). Ce modèle a été conçu pour piloter l'irrigation sur tous types de cultures, de sol et de climat et avec toutes sortes d'eaux y compris des eaux usées ou des eaux salées. Ayant été accueillie dans le laboratoire du Professeur Ragab (Centre for Ecology and Hydrology, Royaume-Uni) pour prendre en main le modèle, elle a découvert un modèle à la fois lourd à paramétrer, peu flexible et ne permettant pas de produire l'une des variables d'intérêt de la salinisation : le Sodium Adsorption Ratio (SAR), un indicateur de la sodisation. Ayant également encadré un stage de master sur l'ACV d'un verger de mandarine au Maroc où la disponibilité et la qualité des données était sensée être bonne, elle a réalisé que le paramétrage de ce modèle dans son cas d'étude ne serait pas possible dans de bonnes conditions faute de pouvoir renseigner tous les paramètres requis. De plus, même en appliquant le modèle à ce cas d'étude en acceptant de poser quelques hypothèses, le résultat sur un seul verger n'aurait pas eu de portée générique utile à la communauté des praticiens d'ACV. Ce constat a été l'occasion d'une profonde remise en question de nos objectifs et des moyens pour les atteindre. L'objectif général reformulé avec l'aide de son comité de thèse serait de construire un cadre conceptuel qui lie la complexité de la méthode d'estimation des flux avec l'objectif de l'étude ACV. Sur la base d'une typologie d'études ACV (par exemple, on peut vouloir comparer deux origines possibles pour un même fruit ou bien discriminer des pratiques agricoles fines dans une même zone), l'idée serait d'identifier les différents niveaux de détail requis pour la méthode d'estimation des flux de sel et d'eau. Pour chaque type d'ACV et niveau de complexité requis une méthode opérationnelle serait soit identifiée soit formalisée (principe des Tiers 1, 2 et 3 de l'IPCC). Enfin, les différentes méthodes d'estimation des flux seraient mises en œuvre et discutées pour le verger de mandarine du Maroc. Notamment, une discussion sur l'incertitude et la robustesse des différentes approches serait proposée. Plusieurs modèles fonctionnels ont déjà été identifiés et vont être analysés prochainement. Un inventaire des bases de données disponibles sera finalisé pour faciliter la mise en œuvre des différentes méthodes proposées.

Modélisation des impacts salinisation en ACV (Post-doctorat Sandra avec collègues ELSA)

Le cadre général pour une prise en compte des impacts salinisation en ACV proposé par Sandra Payen a ouvert des perspectives à la fois pour un travail sur les méthodes d'inventaire et sur les méthodes d'évaluation des impacts pour lesquelles tout reste à faire. Il ne sera pas possible de faire une contribution finalisée sur le modèle de caractérisation des impacts salinisation en ACV pendant la thèse. Par contre, Sandra est en train de finaliser une identification et une hiérarchisation des paramètres clés pour l'inventaire mais aussi pour les impacts salinisation pour les différentes chaînes de cause à effet. Cette analyse représente une étape préliminaire à la phase de modélisation des impacts. Une suite est donc envisagée au travail de thèse de Sandra Payen sous la forme d'un Post-doctorat d'au moins deux ans. Ce post-doctorat sera monté en étroite collaboration avec plusieurs chercheurs reconnus du pôle Elsa sur le thème de l'eau en ACV et de la modélisation des impacts : Philippe Roux (IRSTEA), Ralph Rosenbaum (IRSTEA, animateur de la chaire ELSA-PACT), Montse Nunez (IRSTEA).

3.3.3. Défis à relever à plus long terme

Des trois questions proposées au chapitre 3.2, on comprend que la première : celle de l'évaluation fiable des systèmes horticoles au sud, va représenter un investissement considérable en temps et en ressources. Nous n'avons détaillé dans notre projet que certains aspects de ce premier enjeu. L'évaluation par l'ACV des systèmes pérennes demande également de nombreux efforts de recherche à la fois sur les stratégies pour prendre en compte leur diversité malgré la lourdeur de la collecte de données, sur l'estimation des flux au champ mais aussi sur la prise en compte d'autres catégories d'impact telles que l'occupation des terres, la séquestration du carbone, la biodiversité. Les recherches sur les systèmes pérennes seront certainement abordées en partenariat avec nos collègues de l'UR 34 : Systèmes de pérennes, notamment Cécile Bessou et bien sûr nos collègues agronomes spécialistes des fruitiers tropicaux : Henri Vannière, Fabrice Le Bellec.

La deuxième question : celle de l'amélioration des systèmes sera traitée également au moins partiellement chemin faisant sur les différents cas d'étude. Cependant, la 3^{ème} question sur la possible intégration de l'ACV dans une boucle d'éco-conception reste un défi complexe à relever. Si l'ACV est l'outil d'éco-conception par excellence et que d'une certaine façon toutes les ACV contribuent à l'éco-conception des systèmes étudiés, l'intégration de l'ACV dans une véritable boucle d'éco-conception dynamique impliquant les acteurs pose des problèmes méthodologiques importants a fortiori pour des systèmes agricoles au sud. Dans le cadre du séminaire agro-écologie de Montpellier qui s'était tenu le 3 Juin 2014 (<http://vimeo.com/groups/agroecologie/videos/97338714>), nous avons eu l'occasion avec mes collègues Fabrice Le Bellec et Ludivine Pradeleix de nous poser les questions d'une possible intégration de l'ACV dans une boucle d'éco-conception. Au tableau 6, la présentation des points clés de ces deux démarches en parallèle fait apparaître les difficultés de fait à leur intégration.

Tableau 6. Caractéristiques et enjeux contradictoires des démarches de conception et d'ACV

Conception	ACV
Système innovant, temps de stabilisation, d'apprentissage, technologies immatures	Très nombreuses données à renseigner... en l'absence de données pour des systèmes innovants
Approche dynamique et itérative de la conception (où les paramètres des systèmes changent tout le temps)	Approche statique et rétrospective de l'ACV (où les paramètres sont fixés du début à la fin de l'évaluation)
Intégration des acteurs	Un haut niveau d'expertise requis sur la méthode et l'interprétation des résultats d'ACV (nombreux)

Les principales questions de recherche qui se posent dans ce cadre sont :

- Comment mettre au point des méthodes et outils prédictifs des flux et performances des systèmes innovants ? Recours à la modélisation mécaniste, à l'expertise formalisée, à des modèles conceptuels, simplifiés ?
- Comment prendre en compte les phénomènes et délais d'apprentissage, d'optimisation des acteurs et de stabilisation des systèmes de production agricoles ?
- Comment prendre en compte l'incertitude attachée aux prédictions ?

- Comment permettre l'intégration des acteurs ? recherche du meilleur mode de communication et d'interaction autour de la méthode et des résultats

L'intégration de l'ACV dans une boucle d'éco-conception ne peut donc se faire dès le début du processus de conception car elle implique l'acquisition préalable de connaissances et de données sur le système étudié. Je propose au schéma suivant, un mode d'intégration de l'ACV dans la boucle bien connue de la conception qu'utilise mon collègue Fabrice Le Bellec, qui inclut une phase de découverte du système, d'identification des points critiques et de mise au point d'un modèle simplifié à mettre au service de la boucle d'éco-conception itérative.

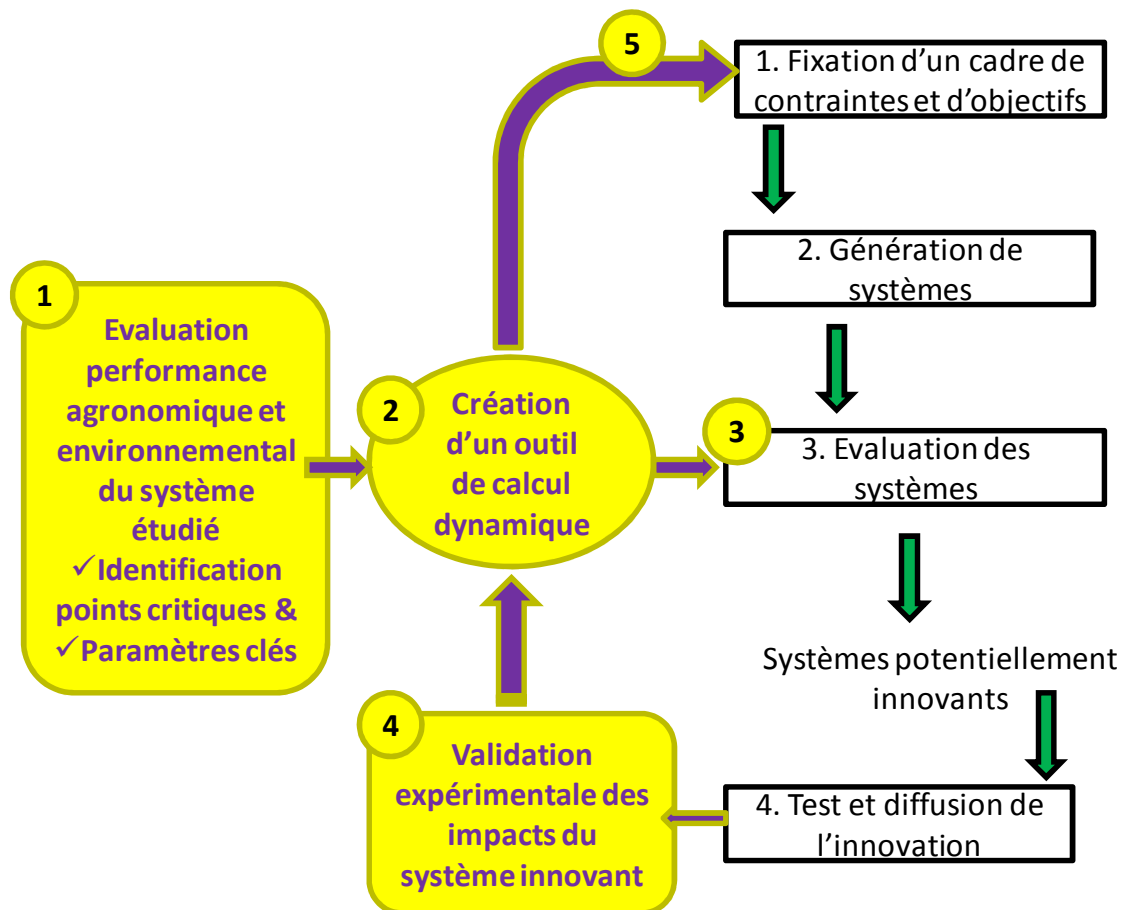


Figure 14. Proposition d'intégration de l'outil ACV dans la boucle de conception adaptée de Loyce et Wery (2006) par Fabrice Le Bellec

Pour finir, la perspective de l'application du cadre conceptuel de l'ACV pour l'évaluation des systèmes horticoles complexes reste sans doute la pépite de nos perspectives, à la fois passionnante et terriblement complexe. Nous avons eu l'occasion dans notre revue critique sur l'application de l'ACV aux systèmes pérennes de formuler certaines questions de recherche pour ces systèmes (Bessou et al. 2013). J'espère vivement pouvoir m'atteler à cette tâche dans un avenir pas trop lointain.

3.3.4. Conclusions

Passer de l'évaluation des systèmes de production d'élevage en zone tempérée à celle des systèmes horticoles au sud a représenté un renouvellement total de mes questions scientifiques. Alors, bien sûr, modestement, je continue d'apprendre. Les enjeux environnementaux et humains de l'horticulture au sud sont immenses. Et encore plus immenses les défis scientifiques qu'ils nous posent. Tout, ou presque, reste à faire. J'ai parfois eu le sentiment au début de mon travail sur les systèmes horticoles au sud, que l'ACV, qui tâche d'intégrer la connaissance d'une manière cohérente et visible, n'avait cette fois rien à intégrer. Erreur de débutante. Je découvre progressivement l'ampleur des connaissances et des expertises chez mes collègues agronomes, modélisateurs, chimistes, écotoxicologues, entomologistes, économistes, mais aussi chez les acteurs de terrain quels qu'ils soient et au Nord comme au Sud.

Le tâche sera collective ou ne sera pas.

4. Liste des références bibliographiques

- Abate, T, van Huis, A, Ampofo, JKO, 2000. Pest Management Strategies in Traditional Agriculture: An African Perspective. *Annual Review of Entomology* 45: 631-659
- Adamou, R, Coly, A, Abdoulaye, A, Soumaila, M, Moussa, I, Ikhiri, K, Tine, A, 2011. Photochemically-Induced Fluorescence Dosage of Non-Fluorescent Pyrethroid (Etofenprox) in Natural Water Using a Cationic Micellar Medium. *Journal of Fluorescence* 21: 1409-1415
- Ahouangninou, C, Fayomi, BE, Martin, T, 2011. Evaluation des risques sanitaires et environnementaux des pratiques phytosanitaires des producteurs maraîchers dans la commune rurale de Tori-Bossito (Sud-Bénin). *Cahiers d'Agriculture* 20 : 216-222. doi : 10.1684/agr.2011.0485
- Ahouangninou, C, Martin, T, Edorh, P, Bio-Bangana, S, Samuel, O, St-Laurent, L, Dion, S, Fayomi, BE, 2012. Characterization of health and environmental risks of pesticide use in market-gardening in the rural city of Tori-Bossito in Benin, West Africa. *Journal of Environmental Protection* 3: 241–248. doi: 10.4236/jep.2012.33030
- Antón, A, Castells, F, Montero, JI, Huijbregts, M, 2004. Comparison of toxicological impacts of integrated and chemical pest management in Mediterranean greenhouses. *Chemosphere* 54 (8): 1225-1235. doi:10.1016/j.chemosphere.2003.10.018
- Antón, A, Montero, J, Muñoz, P, Castells, F, 2005. LCA and tomato production in Mediterranean greenhouses. *Int J Agricultural Resources, Governance and Ecology* 4 (2): 102-112
- Aubry, C, Ramamonjisoa, J, Dabat, M-H, Rakotoarisoa, J, Rakotondraibe, J, Rabeharisoa, L, 2012. Urban agriculture and land use in cities: An approach with the multi-functionality and sustainability concepts in the case of Antananarivo (Madagascar). *Land Use Policy* 29: 429-439
- Audsley, E, Alber, S, Clift, R, Cowell, S, Crettaz, P, Gaillard, G, Hausheer, J, Jolliet, O, Kleijn, R, Mortensen, B, Pearce, D, Roger, E, Teulon, H, Weidema, B, Van Zeijts, H, 1997. Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture. Final Report Concerted Action AIR3-CT94-2028. European Commission, Silsoe, United Kingdom, 70p
- Avraamides, M, Fatta, D, 2008. Resource consumption and emissions from olive oil production: a life cycle inventory case study in Cyprus. *Journal of Cleaner Production* 16: 809–821.
- Berger, M, van der Ent, R, Eisner, S, Bach, V, Finkbeiner, M, 2014. Water accounting and vulnerability evaluation (WAVE): considering atmospheric evaporation recycling and the risk of freshwater depletion in water footprinting. *Environmental Science and Technology* (in press)
- Berger, M, Finkbeiner, M, 2012. Methodological Challenges in Volumetric and Impact-Oriented Water Footprints. *Journal of Industrial Ecology* 17: 79–89
- Bessou, C, Basset-Mens, C, Tran, T, Benoist, A, 2013. LCA applied to perennial cropping systems: a review focused on the farm stage. *International Journal of LCA* 18 (2): 340-361 doi:10.1007/s11367-012-0502-z
- Bidogeza, JC, Berentsen, PBM, Graaff, J, Oude Lansink, AGJM, 2009. A typology of farm households for the Umutara Province in Rwanda. *Food Security* 1: 321–335. doi: 10.1007/s12571-009-0029-8
- Birkved, M, Hauschild, MZ, 2006. PestLCI - A model for estimating field emissions of pesticides in agricultural LCA. *Ecol Model* 198 (3-4): 433-451

- Blazy, J-M, Ozier-Lafontaine, H, Doré, T, Thomas, A, Wery, J, 2009. A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems in Guadeloupe. *Agricultural Systems* 101: 30-41.
- Boulard, T, Raeppe, C, Brun, R, Lecompte, F, Hayer, F, Carmassi, G, Gaillard, G, 2011. Environmental impact of greenhouse tomato production in France. *Agronomy for Sustainable Development* 31 (4): 757-777. doi:10.1007/s13593-011-0031-3
- Boulay A-M, Bouchard C, Bulle C, Deschênes, L, Margni, M. 2011a. Categorizing water for LCA inventory. *International Journal of LCA* 16: 639–651. doi: 10.1007/s11367-011-0300-z
- Boulay, A-M, Bulle, C, Bayart, J-B, Deschênes, L, Margni, M, 2011b. Regional characterization of freshwater Use in LCA: modeling direct impacts on human health. *Environmental Science and Technology* 45: 8948–57. doi: 10.1021/es1030883
- Bouwman, AF, Van Der Hoek, KW 1997. Scenarios of animal waste production and fertilizer use and associated ammonia emission for the developing countries. *Atmospheric Environment* 31: 4095–4102. doi: 10.1016/s1352-2310(97)00288-4
- Brentrup, F, Küsters, J, Lammel, J, Kuhlmann, H, 2000. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 5:349–357. doi: 10.1007/BF02978670
- Bres, W, 2009. Estimation of nutrient losses from open fertigation systems to soil during horticultural plant cultivation. *Polish Journal of Environmental Studies* 18: 341–345
- Cissé, I, Tandia, AA, Fall, ST, Diop, EHS, 2003. Usage Incontrôlé des Pesticides en Agriculture Périurbaine: Cas de la Zone de Niayes au Sénégal. *Cahiers Agricultures* 12(3): 181-186
- Cissé, O, Gueye, NFD, Sy, M, 2005. Institutional and legal aspects of urban agriculture in French-speaking West Africa: from marginalization to legitimization. *Environment and Urbanization* 17: 143-154
- Corson, M, 2012. ACV-SOL : Développement des indicateurs de l'impact des activités agricoles sur la qualité des sols dans l'Analyse du Cycle de Vie. Synthèse du rapport final du programme GESSOL. 41p.
- Cowell, SJ, Clift, R, 2000. A methodology for assessing soil quantity and quality in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 8: 321-331.
- De Baan, L, Alkemade, R, Koellner, T, 2013. Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach. *International Journal of LCA* 18: 1216-1230.
- de Backer, E, Aertsens, J, Vergucht, S, Steurbaut, W, 2009. Assessing the ecological soundness of organic and conventional agriculture by means of life cycle assessment (LCA) A case study of leek production. *Br Food J* 111 (10): 1028-1061. doi:10.1108/00070700910992916
- De Bon, H, Parrot, L, Moustier, P, 2010. Sustainable urban agriculture in developing countries. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 21–32. doi: 10.1051/agro:2008062
- De Bon, H, Huat, J, Parrot, L, Sinzogan, A, Martin, T, Malézieux, E, Vayssières, J-F, 2014. Pesticide risks from fruit and vegetable pest management by small farmers in sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development* (online first). Doi: 10.1007/s13593-014-0216-7.

Diogo, RC, Buerkert, A, Schlecht, E, 2010. Horizontal nutrient fluxes and food safety in urban and peri-urban vegetable and millet cultivation of Niamey, Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 87: 81–102. doi: 10.1007/s10705-009-9315-2

Dijkman, TJ, Birkved, M, Hauschild, MZ, 2012. PestLCI 2.0: a second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA. *International Journal of LCA* 17: 973–986

Doré, T, Sebillotte, M, Meynard, JM, 1997. A Diagnostic Method for Assessing regional Variations in Crop Yield. *Agricultural Systems* 54(2): 169-188

Dossa, LH, Abdulkadir, A, Amadou, H, Sangaré, S, Schlecht, E, 2011. Exploring the diversity of urban and peri-urban agricultural systems in Sudano-Sahelian West Africa: An attempt towards a regional typology. *Landscape and Urban Planning* 102: 197-206.

Eriksen-Hamel, N, Danso, G, 2010. Agronomic considerations for urban agriculture in Southern cities. *International Journal of Agricultural Sustainability* 8 (1&2): 86-93.

ECETOC, 1994. Ammonia emissions to air in Western Europe. Report n. 62, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals, Brussels, Belgium.

EC-JRC (European Commission-Joint Research Centre) - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD), 2011. Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact assessment in the European context. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxemburg. Publications Office of the European Union.

Fantke, P, Juraske, R, Antón, A, Friedrich, R, Jolliet, O, 2011. Dynamic Multicrop Model to Characterize Impacts of Pesticides in Food. *Environmental Science and technology* 45: 8842-8849.

FAO, 2012. Growing greener cities in Africa. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

Feschet, P, 2014. Analyse du Cycle de Vie Sociale. Pour un nouveau cadre conceptuel et théorique. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier 1 – Sciences économiques. 298p.

Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S. 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91: 1–21. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018

Gogo, EO, Saidi, M, Itulya, FM, Martin, T, Ngouajio, M, 2014. Eco-Friendly Nets and Floating Row Covers Reduce Pest Infestation and Improve Tomato (*Solanum lycopersicon* L.) Yields for Smallholder Farmers in Kenya. *Agronomy* 4: 1-12. doi:10.3390/agronomy4010001.

Heijungs, R, Guinée, JB, Huppes, G, Lankreijer, RM, Udo de Haes, HA, Wegener Sleeswijk, A, Ansems, AMM, Eggels, PG, van Duin, R, Goede, HP, 1992. Environmental Life Cycle Assessments of Products, Guide and Backgrounds. Centre of Environmental Science (CML), Leiden university, Leiden, The Netherlands.

Ingwersen, WW, 2012. Life cycle assessment of fresh pineapple from Costa-Rica. *Journal of Cleaner Production* 35: 152-163

IPCC, 2006. Chapter 11: N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In: Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds) IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan, 11.1–11.54

ISO 14040, 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization, ISO 14040:2006

ISO 14044, 2006. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. International Standards Organization, 14044:2006 (E)

Hauschild, M, 2000. Estimating pesticide emissions for LCA of agricultural products. In: Weidema B, Meeusen M (eds) Agricultural data for life cycle assessments, vol 2. Agricultural Economics Research Institute, The Hague, 64-79

Huat, J, 2008. Diagnostic sur la variabilité des modes de conduite d'une culture et de leurs conséquences agronomiques dans une agriculture fortement soumise aux incertitudes : cas de la tomate de plein champ à Mayotte. Thèse de doctorat AgroParisTech – Spécialité Agronomie. 217p.

Köbrich, C, Rehman, T, Khan, M, 2003. Typification of farming systems for constructing representative farm models: two illustrations of the application of multi-variate analyses in Chile and Pakistan. *Agricultural Systems* 76: 141–157. doi: 10.1016/S0308-521X(02)00013-6

Koch, P, Salou, T, 2013. AGRIBALYSE®: Rapport Méthodologique – Version 1.0. Ed ADEME, Angers, France. 401p.

Koellner, T, Baan, L, Beck, T, Brandão, M, Civit, B, Margni, M, Canals, LM, Saad, R, Souza, DM, Müller-Wenk, R, 2013. UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *International Journal of LCA* 18: 1188–1202.

Kounina, A, Margni, M, Bayart, J-B, Boulay, A-M, Berger, M, Bulle, C, Frischknecht, R, Koehler, A, Milà i Canals, L, Motoshita, M, Núñez, M, Peters, G, Pfister, S, Ridoutt, B, Zelm, R, Verones, F, Humbert, S, 2013. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *International Journal of LCA* 18 : 707–721.

Landais, E, 1998. Modelling farm diversity. *Agricultural Systems* 58:505–527. doi: 10.1016/S0308-521X(98)00065-1

Langevin, B, 2010. Prise en compte de la variabilité des émissions au champ dans l'analyse de cycle de vie des systèmes agricoles. Application à l'épandage de lisier. Thèse de doctorat ParisTech – Conception. 116p.

Loyce, C, Wery, J. 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture. Dans: L'agronomie aujourd'hui. Doré, T, Le Bail, M, Martin, P, Ney, B, Roger-Estrade, J. eds. QUAE Editions, 77-95

Malézieux, E, 2011. Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development* (open access). Doi: 10.1007/s13593-011-0027-z.

Malézieux, E, Crozat, Y, Dupraz, C, Laurans, M, Makowski, D, Ozier-Lafontaine, H, Rapidel, B, de Tournonnet, S, Valantin-Morison, M, 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29 : 43-62. Doi: 10.1051/agro:2007057

Milà i Canals, L, 2003. Contributions to LCA methodology for agri-cultural systems, Site-dependency and soil degradation impact assessment. Ph.D. Thesis. Universitat Autònoma de Barcelona, Spain (available from <http://www.tdx.cesca.es/TDX-1222103-1499154811/>)

- Mila i Canals, L, Burnip, GM, Cowell, SJ, 2006. Evaluation of the environmental impacts of apple production using Life Cycle Assessment (LCA): Case study in New Zealand. *Agriculture Ecosystems & Environment* 114 (2-4): 226-238. doi:10.1016/j.agee.2005.10.023
- Milà i Canals, L, Bauer, C, Depestele, J, Dubreuil, A, Freiermuth Knuchel, R, Gaillard, G, Michelsen, O, Müller-Wenk, R, 2007. Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *International Journal of LCA* 12: 5-15
- Mouron, P, Nemecek, T, Scholz, RW, Weber, O, 2006. Management influence on environmental impacts in an apple production system on Swiss fruit farms: Combining life cycle assessment with statistical risk assessment. *Agriculture Ecosystems & Environment* 114 (2-4): 311-322. doi:10.1016/j.agee.2005.11.020
- Nemecek, T, Kägi, T, 2007. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Final report ecoinvent, v2.0 No.15. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich, Switzerland
- Orsini, F, Kahane, R, Nono-Womdim, R, Gianquinto, G, 2013. Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 33:695–720. doi: 10.1007/s13593-013-0143-z
- Payraudeau, S, van der Werf, HMG, 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 107: 1–19. doi: 10.1016/j.agee.2004.12.012
- Perrin, A, 2013. Evaluation environnementale des systèmes agricoles urbains en Afrique de l’Ouest : Implications de la diversité des pratiques et de la variabilité des émissions d’azote dans l’Analyse du Cycle de Vie de la tomate au Bénin. Thèse de doctorat AgroParisTech – Sciences agronomiques et écologiques. 176p.
- Poussin, JC, Imache, A, Beji, R, Le Grusse, P, Benmihoub, A, 2008. Exploring regional irrigation water demand using typologies of farms and production units: An example from Tunisia. *Agricultural Water Management* 95: 973–983. doi: 10.1016/j.agwat.2008.04.001
- Pfister, S, Koehler, A, Hellweg, S, 2009. Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology* 43: 4098–4104.
- Pfister, S, Bayer, P, 2014. Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. *Journal of Cleaner Production* 73: 52-62
- Predotova M, Bischoff W-A, Buerkert A, 2011. Mineral-nitrogen and phosphorus leaching from vegetable gardens in Niamey, Niger. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174:47–55. doi: 10.1002/jpln.200900255
- Predotova M, Gebauer J, Diogo RVC, Schlecht E, Buerkert A, 2010. Emissions of ammonia, nitrous oxide and carbon dioxide from urban gardens in Niamey, Niger. *Field Crops Research* 115: 1–8. doi: 10.1016/j.fcr.2009.09.010
- Ragab, R, 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environmental Modelling and Software* 17: 345-361. Doi: 10.1016/S1364-8152(01)00079-2
- Rosenbaum, RK, Bachmann, TM, Swirsky Gold, L, Huijbregts, MAJ, Jolliet, O, Juraske, R, Koehler, A, Larsen, HF, Macleod, M, Margni, M, McKone, TE, Payet, J, Schuhmacher, M, Van de Meent, D, Hauschild, MZ, 2008. USEtox—the UNEP–SETAC toxicity model: recommended characterisation

factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. *International Journal of LCA* 13 : 532–546

Taylor, RAJ, Shalevet, S, Spharim, I, Berlinger, MJ, Lebiush-Mordechi, S, 2001. Economic evaluation of insect-proof screens for preventing tomato yellow leaf curl virus of tomatoes in Israel. *Crop Protection* 20 : 561-569

Tendall, DM, Raptis, C, Verones, F, 2013. Water in life cycle assessment—50th Swiss Discussion Forum on Life Cycle Assessment—Zürich, 4 December 2012. *International Journal of LCA* 18 : 1174–1179

Traoré, SK, Mamadou, K, Dembele, A, Lafrance, P, Mazelliert P, Houenou, P, 2006. Contamination de l'Eau Souterraine par les Pesticides en Régions Agricoles en Côte-d'Ivoire (Centre, Sud et Sud Ouest). *Journal Africain des Sciences de l'Environnement* 1 : 1-9.

United Nations, 2012. World Population Prospects: The 2012 Revision. <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>.

Van der Werf, HMG, Petit, J, 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 93: 131–145. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00354-1

Van Zelm, R, Stam, G, Huijbregts, MAJ, van de Meent, D, 2013. Making fate and exposure models for freshwater ecotoxicity in life cycle assessment suitable for organic acids and bases. *Chemosphere* 90: 312-317.

Van Zelm, R, Larrey-Lassalle, P, Roux, P, 2014. Bridging the gap between life cycle inventory and impact assessment for toxicological assessments of pesticides used in crop production. *Chemosphere* 100: 175-181.

Weinberger, K, Lumpkin, T, 2007. Diversification into horticulture and poverty reduction: A research agenda. *World Development* 35(8), 1464-1480.

World Bank, 2013. Urban Agriculture - Findings from Four City Case Studies. n. 18, The World Bank Group, Washington, USA

5. Annexes

Annexe 1. Curriculum Vitae

Données personnelles

Etat civil

Claudine Basset-Mens

Née à Lyon le 18 Septembre 1974
Nationalité française
Mariée, 3 enfants

Adresse professionnelle

UPR Hortsys, Boulevard de la Lironde, TA B-103/PS4
34398 Montpellier Cedex 5 France
Tel : +33 4 67 61 57 81
Fax : +33 4 67 61 56 88
Claudine.basset-mens@cirad.fr

Profession et compétences

Profession

Chercheuse, agronome, docteur en Sciences environnementales

Fonction actuelle

Chercheuse en évaluation environnementale (ACV) des produits horticoles tropicaux dans l'UPR Hortsys – Fonctionnement agroécologique et Performances des systèmes de culture horticoles

Organisme

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) – Département PERSYST – Montpellier, France

Compétences

Evaluation environnementale globale par la méthodologie Analyse du Cycle de Vie (ACV) des systèmes de production agricole animaux et végétaux ; prise en compte de la diversité des pratiques ; modélisation des systèmes pérennes ; ACV de technologies innovantes ; éco-conception ; estimation et variabilité des flux au champ ; incertitude des résultats d'impact ; modélisation des impacts environnementaux : eutrophisation, consommation eau douce, salinisation ;

Diplômes

Doctorat en sciences environnementales, ENSA Rennes, France.
« Proposition pour une adaptation de l'analyse de cycle de vie (ACV) à la production agricole – Mise en œuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine », soutenu en mai 2005

Diplôme d'ingénieur agronome (1997), Agro Montpellier, France.
Spécialisation : gestion des effluents et des déchets

Compétences linguistiques

Français (langue maternelle),
Anglais (courant),
Espagnol (bon niveau),
Arabe tunisien (conversation)

Compétences informatiques

Logiciels Microsoft Office,
SIMAPRO 7.2 (ACV),
@Risk, Recherche Internet et BDD

Expériences professionnelles

2009-présent

Chercheuse - Evaluation environnementale (ACV) produits horticoles tropicaux, CIRAD (<http://www.cirad.fr>), département PERSYST, Unité HortSys (UPR 103), Montpellier, France.

- Animation scientifique interne CIRAD : proposition et mise en place d'une plate-forme ACV avec logiciel et base de données centralisés et embauche d'un ingénieur base de données ACV ; encadrement de l'ingénieur ; co-animation scientifique du groupe acv-cirad
- Montage et coordination de projets de recherche publics et privés (ANR, FP7, ADEME (AgriBALYSE), EUROPAID, ODEADOM)
- Encadrements de doctorants et post-doctorants sur développements méthodologiques de l'ACV pour les produits tropicaux :
 - Prise en compte de la diversité des pratiques
 - Estimation des flux d'émissions au champ en contexte tropical en intégrant la variabilité sol, climat, pratiques
 - Prise en compte de l'eau comme ressource dans l'ACV
 - Analyse et proposition d'un cadre de modélisation des chaînes d'impact salinisation
 - Modélisation des flux de pesticides au champ
 - Prise en compte et quantification de l'incertitude des résultats d'ACV
- Modélisation des systèmes pérennes tropicaux en ACV
- Animation scientifique externe CIRAD : membre du pôle ELSA (Environmental Lifecycle and Sustainability Assessment) et représentante CIRAD au bureau ELSA

2008-2009

Ingénieur de recherche - poste d'accueil scientifique de haut niveau sur l'Analyse de cycle de vie, systèmes agricoles et alimentaires, Cemagref (<http://www.cemagref.fr/>), Montpellier, France.

- Diagnostic et positionnement de l'activité analyse de cycle de vie au Cemagref
- Animation scientifique et appui méthodologique interne Cemagref et au niveau de la plate forme régionale Ecotech LR sur l'ACV (équipe ELSA)
- Encadrement thèses :
- Brigitte Langevin : Analyse de Cycle de Vie des procédés d'épandage d'effluents en agriculture
- Positionnement scientifique et montage de projets et partenariats sur l'ACV aux plans national et international

2005-2008

Chercheuse (« senior scientist ») sur l'efficacité environnementale des systèmes de production agricole et alimentaire, AgResearch, Hamilton, Nouvelle Zélande (www.agresearch.co.nz), principal

centre de recherche NZ, spécialisé secteur pastoral, 1000 employés, Département Agriculture et Environnement, section Climat, Territoire et Environnement.

Encadrants : Dr Stewart Ledgard, Dr Liz Wedderburn

- Modélisation et analyse du cycle de vie (et études spécifiques de l'empreinte carbone) de produits laitiers, viandes de bœuf et mouton, laine – comparaison de scénarios de production contrastés :
 - différents niveaux d'intensification (incluant l'analyse de cycle de vie de scénarios à l'utilisation croissante d'aliments importés tels que palmiste de Malaisie, soja du Brésil...),
 - nouvelles technologies (utilisation de nouvelle génération de ray-grass, digestion du méthane, inhibiteur de nitrification)
 - diversité de production interrégionale,
- Travaux de recherche méthodologiques sur l'ACV : indicateur eutrophisation aquatique, modélisation stochastique (analyse d'incertitude), harmonisation de la méthodologie ACV du lait entre les études européennes et NZ (projet de collaboration),
- Montage d'une équipe « ACV sociale » avec trois collègues chercheurs en science sociale et démarrage d'un projet sur l'ACV sociale du lait NZ,
- Participation au démarrage et aux activités d'une équipe multidisciplinaire : aspects environnementaux, sociaux et économiques, sur la prise en compte globale de la durabilité des systèmes agricoles et de leurs interactions avec les communautés,
- Participation à un programme national de recherche sur la quantification de l'empreinte écologique des secteurs primaires de l'économie Néo-zélandaise (matrice input/output),
- Rédaction de projets de recherche et de demandes de financement acceptées.

2002-2005

Doctorante, Institut National de la Recherche Agronomique, Département Environnement et Agronomie, Rennes, France

Encadrants : Dr Hayo van der Werf, Prof. Philippe Leterme

- Découverte de l'ensemble des méthodes d'évaluation de la durabilité des systèmes agricoles,
- Analyse du Cycle de Vie de scénarios contrastés de production de porc : conventionnel bonnes pratiques agricoles, conventionnel surfertilisé, label de qualité porc fermier label rouge, agriculture biologique. Production de données d'inventaire spécifiques, quantification de l'incertitude, points faibles et recommandations,
- Amélioration méthodologique de la catégorie eutrophisation aquatique :
 - Bases conceptuelles et modèles utilisés en ACV –

diagnostic et proposition pour la catégorie eutrophisation aquatique

- Mise au point d'une méthode d'estimation du facteur de devenir du nitrate dans les bassins versants à l'échelle régionale
- Implications de ces facteurs de devenir du nitrate spatialisés sur les résultats d'eutrophisation et de changement climatique,
- Analyse et hiérarchisation des principales sources d'incertitude des résultats d'ACV de produits agricoles,
- Cours aux élèves ingénieurs sur la présentation des indicateurs environnementaux et de durabilité et plus spécifiquement sur l'analyse du cycle de vie.

1999-2001

Chargée d'études, Union des Coopératives Agricoles d'Agrofournitures (INVIVO, ex UNCAA), département fertilisation organique, Nîmes, France

- Diagnostic de problématiques déchets pour les coopératives agricoles,
- Conseil agronomique et réglementaire sur la qualité et l'utilisation en agriculture des produits organiques,
- Participation aux travaux de normalisation, Bureau de Normalisation des Supports de Culture et Amendements Organiques (BNSCAO) et Commission des Matières Fertilisantes et Supports de Culture (CMFSC), Paris, France,
- Formation aux principes de la fertilisation organique de personnels technico-commerciaux en coopératives.

1997-1998

Ingénieur, Institut National de Recherche Génie Rural Eaux et Forêt (INRGREF), Tunis, Tunisie

Encadrante : Dr Akissa Bahri

- Diagnostic global de la réutilisation des eaux usées sur les terrains de golf tunisiens,
- Analyse de la qualité agronomique et sanitaire des eaux usées employées pour irriguer les golfs,
- Evaluation et optimisation de la phase de stockage en bassins des eaux usées sur les golfs.

1996

Stage en agronomie, Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), station expérimentale de Bébédjia, Tchad.

Evaluation de l'impact de la pépinière sur l'activité des agriculteurs de la zone soudanienne du Tchad.

Autres compétences et activités

Revue régulière d'articles pour des journaux à comité de lecture : Science of the Total Environment ; Agriculture, Ecosystems and environment ; International Journal of LCA ; Journal of Cleaner production ; Journal of Ecological Economics ; Agricultural

Systems ; Agronomy for Sustainable Development ; Irrigation and Drainage

Membre du comité scientifique de conférences internationales :

2nd International conference on “Quantified eco-efficiency analysis for sustainability”, 28-30 June 2006, Egmond aan Zee, The Netherlands.

International conference in the Agri-Food sector: Zürich 2008; Bari 2010; Saint Malo 2012; San Francisco 2014

Membre de jury de recrutement : participation au recrutement des collègues ACV/évaluation environnementale pour les unités CIRAD 34 (2009), 42 (2010), 75 (2011) et pour l’UMR ITAP de l’IRSTEA (2010)

Annexe 2. Liste des publications

Les auteurs dont le nom est écrit en gras sont des étudiants que j'ai encadrés ou co-encadrés.

Articles dans des revues à comité de lecture

Payen, S., Basset-Mens, C., Perret, S.R., 2014. LCA of local and imported tomato: Does the inclusion of freshwater use impacts change the environmental ranking? Submitted to Journal of Cleaner Production, January 2014. *Accepted with minor revisions.*

Langevin B., Genermont S., Basset-Mens C., Lardon L. 2014. Simulation of field NH₃ and N₂O emissions from slurry spreading. Agronomy for Sustainable Development (in press).

Perrin, A., Basset-Mens, C., Huat, J., Yehouessi, W. 2014b. High environmental risk and low yield of urban tomato gardens in Benin. Agronomy for Sustainable Development (online first).

Perrin A., Basset-Mens C., Gabrielle B., 2014a. Life cycle assessment of horticultural products: a review focusing on cropping systems diversity and the estimation of field emissions. Int J LCA 19:1247-1263.

Thanawong, K., Perret, S.R., Basset-Mens, C., 2014. Eco-efficiency of paddy rice production in Northeastern Thailand: a comparison of rain-fed and irrigated cropping systems. Journal of Cleaner Production (online first) 1-14.

Thanawong, K., Perret, S.R., Basset-Mens, C., 2013. The environmental impacts of low land paddy rice: a case study comparison between rainfed and irrigated rice in Thailand. Cahiers d'Agriculture: 22(5), Septembre-Octobre 2013.

Bessou C., Basset-Mens C., Tran T., Benoist A., 2013. LCA applied to perennial cropping systems: a review focused on the farm stage. Int J LCA 18: 340-361.

Langevin, B., Basset-Mens, C., Lardon, L., 2010. Inclusion of the variability of diffuse pollutions in LCA – the case of slurry application techniques. Journal of Cleaner Production, 18, 747-755.

Basset-Mens C., Small, B., Paragahawewa, U., **Langevin, B.**, Blackett, P., 2009c. Life cycle thinking and sustainable food production. International Journal of Lifecycle Product Management 4(1/2/3), 252-269.

Basset-Mens C., Ledgard S., Kelliher F.M., Cox N., 2009b. Uncertainty of Global Warming Potential for milk production on a New Zealand farm and implication for decision-making. International Journal of LCA 14, 630-638.

Basset-Mens C., Ledgard S., Boyes M., 2009a. Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. Journal of Ecological Economics 68, 1615-1625.

Basset-Mens Claudine and Hayo van der Werf (Lead Authors); Marco Bertaglia (Topic Editor). 2007. "Life cycle assessment of farming systems." In: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the

Environment). [Published July 10, 2007; Retrieved July 19, 2007].
<http://www.eoearth.org/article/Life_cycle_assessment_of_farming_systems>

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., Robin P., Morvan Th., Hassouna M., Paillat J-M., Vertès F., 2006a. Methods and data for the environmental inventory of contrasting pig production systems. *Journal of Cleaner Production* 15, 1395-1405.

van der Werf H.M.G., Tzilivakis J., Lewis K., Basset-Mens C., 2006. Environmental impacts of farm scenarios according to five assessment methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 327-338.

Basset-Mens C., **Anibar L.**, Durand P., van der Werf H. M. G., 2006b. Spatialised fate factors for nitrate in catchments: Modelling approach and implication for LCA results. *Science of the Total Environment* 367, 367-382.

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., Durand P., Leterme Ph., 2006c. Implications of Uncertainty and Variability in the Life Cycle Assessment of Pig Production Systems. *International Journal of LCA* 11(5), 298-304.

Basset-Mens C., 2005. Propositions pour une adaptation de l'Analyse de Cycle de Vie aux systèmes de production agricole. Mise en œuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine. PhD Thesis. Géosciences Rennes (Ed.), No 11, 242p, Rennes, France.

Halberg N., van der Werf H.M.G., Basset-Mens C., Dalgaard R., de Boer I., 2005. Environmental Assessment tools for the evaluation and improvement of European livestock production systems. *Livestock Production Science* 96, 33-50.

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., 2005. Scenario-based environmental assessment of farming systems : the case of pig production in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105, 127-144.

Bahri A., Basset C., Oueslati F., Brissaud F., 2001. Reuse of reclaimed wastewater for golf course irrigation in Tunisia. *Water Science and Technology* 43(10), 117-124.

Bahri A., Basset C., Jrad Fantar A., 2000. Agronomic and health aspects of storage ponds located on a golf course irrigated with reclaimed wastewater in Tunisia. *Water Science and Technology* 42(10-11), 399-406.

Chapitre d'ouvrage

Langevin B., Lardon L., Basset-Mens C. 2011. The use of models to account for the variability of agricultural data. In : Finkbeiner Matthias (ed.). *Towards life cycle sustainability management*. Dordrecht : Springer [Pays-Bas], p. 301-308. [20111025]. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1899-9_29

Communications orales dans des congrès internationaux

Basset-Mens, C., **Payen, S.**, Braun, A., Vannière, H., Jannoyer, M. 2014. Including tropical fruits in the French eco-verification scheme: the case of mango from Brazil. The 29th International Horticultural Congress, 17 – 22 August 2014, Brisbane, Australia.

Basset-Mens, C., Vannière, H., Grasselly, D., **Heitz, H.**, Braun, A., **Payen, S.**, Koch, P. 2014. Environmental impacts of imported versus locally-grown fruits for the French market as part of the AGRIBALYSE® program. The 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector. 8 – 10 October 2014, San Francisco (USA).

Bessou, C., Basset-Mens, C., Latunussa, C., Vélu, A., **Heitz, H.**, Vannière, H. 2014. LCA of perennial crops: implications of modeling choices through two contrasted case studies. The 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector. 8 – 10 October 2014, San Francisco (USA).

Payen, S., Basset-Mens, C., Follain, S., Grünberger, O., Marlet, S., Núñez, M., Perret, S. 2014. Pass the salt please! From a review to a theoretical framework for integrating salinization impacts in food LCA. The 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector. 8 – 10 October 2014, San Francisco (USA).

Colomb, V., Ait Amar, S., Basset Mens, C., Gac, A., Gaillard, G., Koch, P., Mousset, J., Salou, T, Tailleur, A., van der Werf, H.M.G. 2014. AGRIBALYSE®, the French LCI Database for agricultural products: high quality data for producers and environmental labelling. The 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector. 8 – 10 October 2014, San Francisco (USA).

Perrin, A., Basset-Mens, C., Gabrielle, B., 2013. The use of a mechanistic model to estimate the emissions of reactive Nitrogen for the Life-Cycle Assessment of tomato production in Benin, West Africa. The 8th Life Cycle Conference: Pathways to Greening Global Markets- 16th to 18th of July, Sydney, NSW, Australia.

Payen, S., Basset-Mens, C., 2013. Environmental assessment with Life Cycle Assessment of tomato produced in Morocco and exported to France: the importance of freshwater use impacts. SWUPMED conference, 10 – 15 March 2013, Agadir, Morocco.

Perrin A., Basset-Mens C., Yehouessi W., Huat J., Gabrielle B., Malezieux E., 2012. Agronomical analysis of Life-Cycle Impact Assessment (LCIA) variability for horticultural cropping systems at regional scale: the case study of tomato cropping systems in the Beninese coastal area. European Society of Agronomy 12th congress 20-24 August 2012, Helsinki (Finland).

Perrin A., Basset-Mens C., Yehouessi W., Huat J., Gabrielle B., 2012. An LCIA-based typology for more representative results and refined data collection of a horticultural cropping system in the Tropics - The Case of tomato production in Benin, West Africa. The 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector. 2 – 4 October 2012, Saint Malo (France).

Perrin A., Basset-Mens C., 2012. Faisabilité et pertinence de l'estimation par STICS des émissions d'azote réactif (Nr) de la culture de tomate de contre saison au Bénin dans le cadre ACV. Colloque STICS, 16 – 19 Octobre, Orleans (France).

Koch P., Gaillard G., van der Werf, HMG, Biard Y., Basset-Mens C., Gac A., Lellahi A., Paillier A., 2011. Methodological guidelines for LCA of French agricultural products. LCM conference, 28 – 31 August 2011, Berlin (Germany).

Langevin B., Basset-Mens C., Lardon L., 2011. The use of models to account for the variability of agricultural data. LCM conference, 28 – 31 August 2011, Berlin (Germany).

Basset-Mens C., Vannière, H., **Heitz, H.**, Malézieux, E., Jannoyer, M., 2010. Life Cycle Assessment (LCA) as a tool to design eco-friendly horticultural systems – the case of citrus from Morocco. AGRO 2010, 29th of August – 3rd of September 2010, Montpellier, France.

Basset-Mens C., Benoist A., Bessou, C., Tran, Th., Perret, S., Vayssières, J., Wassenaar, T., 2010. Is LCA-based eco-labelling reasonable? The issue of tropical food products. The 7th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector. 22 – 24 September 2010, Bari (Italy).

van der Werf H.M.G., Gaillard G., Biard Y., Koch P., Basset-Mens C., Gac A., Lellahi A., Deltour L. 2010. Creation of a public LCA database of French agricultural raw products: agriBALYSE. The 7th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector. 22 – 24 September 2010, Bari (Italy).

Basset-Mens C., **Siblot, S.**, McLaren, S., Ledgard, S., Boyes, M., 2009. L'Analyse de Cycle de Vie appliquée aux produits d'élevage : le cas des produits laitiers de Nouvelle Zélande. Colloque de l'Académie d'Agriculture de France : Elevages intensifs et environnement – Les effluents : menace ou richesse ? 28 Avril 2009. MEEDDAT, Paris, France.

Basset-Mens C., Small B., Paragahawewa U., **Langevin B.**, Blackett P., 2008. Can LCA contribute towards sustainable food production? 8th International conference on EcoBalance, 10–12 December 2008, Tokyo, Japan.

Basset-Mens C., 2008. Estimating the carbon footprint of raw milk at the farm gate: methodological review and recommendations. 6th International conference on LCA in the Agri-food sector, 12–14 November 2008, Zürich, Switzerland.

Basset-Mens C., McLaren S., Ledgard S., 2007b. Exploring a comparative advantage for New Zealand cheese in terms of environmental performance. 5th International conference LCA in foods, 25-26 April 2007, Gothenburg, Sweden.

Ledgard S., Basset-Mens C., McLaren S., Boyes M., 2007a. Energy use, “food-miles” and greenhouse gas emissions from New Zealand dairying – How efficient are we? 69th New Zealand Grassland conference, 13-15 November 2007, Taupo, New Zealand.

Basset-Mens C., Ledgard S., Cox N., Kelliher F.M., Carran A., 2006d. Uncertainty of global warming potential of milk production on an average New Zealand dairy farm. 5th Australian conference on Life Cycle Assessment, 22-24 November 2006. Melbourne, Australia.

Basset-Mens C., Ledgard S., Jensen R., Clark D., Boyes M., 2006e. Eco-efficiency of increasing intensification scenarios of milk production in New Zealand. 2nd International conference on “Quantified eco-efficiency analysis for sustainability”, 28-30 June 2006, Egmond aan Zee, Netherlands.

Basset-Mens C., Ledgard S., Carran A., 2005. First Life Cycle Assessment of milk production from NZ dairy farm systems. Australian New Zealand Society of Ecological Economics conference – 11-13 December 2005, Palmerston North, New Zealand.

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., Durand P., Leterme Ph., 2004. Implications of uncertainty and variability in the Life Cycle Assessment of Pig Farming Systems. The International Environmental Modelling and Software Society Conference (iEMSs), 14-17 June 2004, Osnabrück, Germany.

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., 2004a. Environmental assessment of contrasting pig farming systems in France. 4th International Conference: Life Cycle Assessment in the Agri-food sector, 6-8 October 2003, Horsens, Denmark.

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., 2004b. Environmental assessment of contrasting pig farming systems in France (in French). Journées Recherche Porcine 36, 47-52.

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., 2003. Multicriteria environmental assessment of contrasting pig farming systems. 6th International Livestock Farming System Symposium (ILFSS), 26-29 August 2003, Benevento, Italy.

Basset C., Bahri A., Romdhane M.S., Jrad-Fantar A., 1998. Diagnosis of golf course irrigation with reclaimed water, (in French), Proc. DGGR-INRGREF Seminar on « Agricultural reuse of reclaimed water », 27-28 May 1998, Hammamet, Tunisia.

Poster dans des congrès internationaux

Burns, M., Perrin, A., Roux, P., Basset-Mens, C., 2013. Do the current Life Cycle Inventory (LCI) methods adequately account for the Life of a pesticide in horticultural production systems? A review. The 8th Life Cycle Conference: Pathways to Greening Global Markets- 16th to 18th of July, Sydney, NSW, Australia.

Burns, M., Roux, P., Sinfort, C., Basset-Mens, C., Malézieux., E., 2012. Improving pesticide accounting in horticultural LCA: A review of existing LCI practice, and LCI and Ecological Risk Assessment (ERA) models. The 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food sector. 2 – 4 October 2012, Saint Malo (France).

Basset-Mens C., Blackett P., Paragahawewa U.H., Small B., 2007b. Preliminary considerations on social LCA of New Zealand dairy products. 5th International conference LCA in foods, 25-26 April 2007, Gothenburg, Sweden.

Annexe 3. Liste des étudiants encadrés

Encadrement de post-doctorant

Mitchell Burns (2012) : Post-doctorat de 12 mois dans le cadre du projet ANR FLONUDEP

Titre : First analysis and testing of the PestLCI model

Rédaction d'une publication scientifique de review

Co-encadrement de doctorants (tutrice principale)

Brigitte Langevin (2008-2010) : ParisTech (Institut des sciences et technologies), ED Sciences des métiers de l'Ingénieur, Arts et Métiers ParisTech. Encadrement principal à partir de la 2^{ème} année.

Directeur de thèse : Daniel Froelich

Titre : Prise en compte de la variabilité des émissions au champ dans l'Analyse de Cycle de Vie des systèmes agricoles. Application à l'épandage de lisier.

→ 2 publications scientifiques avec la doctorante en première auteure, un chapitre d'ouvrage (C1) et une publication avec la doctorante en co-auteur.

Aurélié Perrin (2010-2013) : ParisTech (Institut des sciences et technologies), ED ABIES AgroParisTech.

Directeur de thèse : Benoît Gabrielle

Titre : Evaluation environnementale des systèmes agricoles urbains en Afrique de l'Ouest : Implications de la diversité des pratiques et de la variabilité des émissions d'azote dans l'Analyse du Cycle de Vie de la tomate au Bénin.

→ 2 publications scientifiques avec la doctorante en première auteure et au moins un papier en préparation.

Sandra Payen (2011-2015) : Université Montpellier 2, ED SIBAGHE

Directeur de thèse : Sylvain Perret

Titre : Toward a consistent accounting of water as a resource and a vector of pollution in the LCA of agricultural products: Methodological development and application to a horticultural cropping system

→ 1 publication scientifique avec la doctorante en première auteure et au moins un papier en préparation.

Participation à des comités de thèse

Rafaela Caitano (2012-2015) : "Environmental evaluation at watershed scale by Life Cycle Assessment", Supagro,

Directrice de thèse: Professeur Carole Sinfort

Ludivine Pradeleix (2010-2013) : "Environmental evaluation of irrigated systems with Life Cycle Assessment", Supagro,

Directrice de thèse: Professeur Véronique Bellon-Maurel

Pauline Feschet (2009-2013) : “Propositions for the inclusion of the socio-economic dimension in the Life Cycle Assessment framework”, Université Montpellier 1,
Directeur de thèse : Professeur Michel Garrabé

Pierre Collet (2009-2012) : “Dynamic Life Cycle Assessment of biogas production from micro-algae”, Supagro,
Directeur de thèse: Jean-Philippe Steyer

Encadrement d'étudiants en Master 2 (Bac +5)

Lamiaa Anibar (2003), Université d'Aix-Marseille, DEA « science de l'environnement marin », 6 mois
Titre : Exploration des variations spatiales et temporelles du facteur de devenir du nitrate dans les bassins versants bretons à l'aide du modèle INCA

→ 1 publication scientifique avec l'étudiante en co-auteur

Christophe Cogny (2006), INA-PG, 3^{ème} année, 6 mois

Titre : Analysis of the possibilities of improving the aquatic eutrophication indicator of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in the New Zealand context

Hadrien Heitz (2010), INA-PG, 3^{ème} année, 6 mois + 6 mois de CDD

Titre : Evaluation environnementale de fruits d'importation par L'Analyse du Cycle de Vie : le cas des petits agrumes produits au Maroc et consommés en France

→ 2 publications en préparation.

Sandra Payen (2011), Supagro, 3^{ème} année, 6 mois

Titre : Evaluation environnementale par l'Analyse du Cycle de Vie : Cas de la tomate primeur du Maroc exportée en France

Melaine Loch-Ravelontsalama (2014), Master 2 EAU spécialisation Agriculture – cohabilitation AgroParisTech – Supagro - Université Montpellier 2 (encadrement principal Sandra Payen et Henri Vannière)

Titre : Analyse du cycle de vie de la mandarine Nadorcott du Maroc

Maeva Marcin (2014), Supagro, 3^{ème} année, 6 mois (encadrement principal Yannick Biard, Jean-Paul Gurlot, Alain Renou)

Titre : Analyse du cycle de vie du coton malien selon un mode de production biologique ou conventionnel

Encadrement d'étudiants en Master 1 (Bac +4)

Stanislas Siblot (2007), INA-PG, 2^{ème} année, 6 mois

Titre : Eco-efficiency of high producing dairy systems in NZ

Samuel Causse (2009), Supagro, 2^{ème} année, 3 mois

Titre rapport 1 : Comparaison méthodologique entre la méthode Analyse de Cycle de Vie et la méthode INDIGO

Titre rapport 2 : A comparative LCA of greenhouse and open-field horticultural production in a tropical context: the case study of tomato production in the Reunion Island

Annexe 4. Sélection de 5 publications.

Perrin, A., Basset-Mens, C., Huat, J., Yehouessi, W. 2014. High environmental risk and low yield of urban tomato gardens in Benin. *Agronomy for Sustainable Development* (in press).

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., Robin P., Morvan Th., Hassouna M., Paillat J-M., Vertès F., 2006a. Methods and data for the environmental inventory of contrasting pig production systems. *Journal of Cleaner Production* 15, 1395-1405.

Basset-Mens C., Anibar L., Durand P., van der Werf H. M. G., 2006b. Spatialised fate factors for nitrate in catchments: Modelling approach and implication for LCA results. *Science of the Total*

Basset-Mens C., Ledgard S., Boyes M., 2009a. Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Journal of Ecological Economics* 68, 1615-1625.

Basset-Mens C., Ledgard S., Kelliher F.M., Cox N., 2009b. Uncertainty of Global Warming Potential for milk production on a New Zealand farm and implication for decision-making. *International Journal of LCA* 14, 630-638.